

# 核電廠地下水防護管制廠址模型及監 測作業技術要項研析

期末報告(定稿版)

受託單位：中華民國地球物理學會

計畫執行期間：113年3月27日至113年12月31日

中華民國 113 年 11 月

## 中文摘要

為研析我國核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性，核安會於108年至112年間委託研究計畫已探討廠址水文地質參數之評析準則，並逐年對核一、二、三廠地下水傳輸模式與防護監測方案進行檢視，亦蒐集國際核電廠相關案例經驗，提升我國核電廠除役地下水防護方案審查及管制能力。

本計畫目的為進行核電廠地下水防護管制廠址模型及監測作業技術要項研析，計畫完成三項重要工作。工作項目一為參考國際相關文獻，研析核能電廠地下水防護方案廠址概念模型建置要項，提出管制單位審查、視察之建議事項。工作項目二為參考國內外相關文獻，研析核能電廠地下水防護方案地下水監測井建置及測試要項，提出管制單位審查、視察之建議事項。工作項目三為蒐集國際核能電廠地下水防護實務案例或管制作法，彙整研析重點事項，提出可供我國核能電廠地下水防護作業之管制建議。

## **Abstract**

To analyze the groundwater protection and regulation for decommissioned nuclear power plant sites in Taiwan, the Nuclear Safety Commission (NSC) commissioned research projects from 2019 to 2023. The projects analyzed evaluation criteria for site hydrogeological parameters and reviewed groundwater transport models. Protection and monitoring programs for the Chin-Shan Nuclear Power Plant, Kuosheng Nuclear Power Plant and Maanshan Nuclear Power Plant are also examined. Additionally, relevant international case studies were collected to enhance the capabilities of Taiwan's groundwater protection plan review and regulatory processes for decommissioned nuclear power plants.

The objective of this project is to conduct a technical analysis of site modeling and monitoring procedures for groundwater protection and control at nuclear power plants, completing three key tasks. Task 1 involves analyzing international literature to identify essential elements for developing site conceptual models for nuclear power plant groundwater protection programs, offering recommendations for regulatory reviews and inspections. Task 2 includes analyzing both domestic and international literature to determine key elements in constructing and testing groundwater monitoring wells within nuclear power plant protection programs, providing further suggestions for regulatory review and inspection. Task 3 involves

collecting practical cases or control practices for groundwater protection at international nuclear power plants, summarizing key elements, and proposing regulatory recommendations applicable to groundwater protection operations at Taiwan's nuclear power plants.

# 期末報告

## 目錄

第一章 計畫目的與工作 .....	1
1.1 計畫緣起與目的 .....	1
1.2 計畫工作內容 .....	3
1.3 計畫報告章節說明 .....	4
第二章 核能電廠地下水防護方案廠址概念模型建置要項 .....	5
2.1 廠址概念模型定義 .....	5
2.2 廠址概念模型建置流程 .....	8
2.3 EPRI 指引的建立廠址概念模型導則 .....	12
2.4 廠址概念模型建置要項評析 .....	19
第三章 核能電廠地下水防護方案地下水監測井建置及測試要項 .....	22
3.1 廠址特徵分析與地下水監測 .....	22
3.2 監測井設計、建置與試驗 .....	24
3.3 EPRI 指引的監測井建置導則 .....	28
3.4 台灣環境部地下水水質監測井設置作業原則 .....	36
3.5 監測井建置要項評析 .....	46
第四章 國際核電廠運轉與除役期間廠址地下水防護實務經驗 .....	48

4.1 加拿大 Bruce Nuclear Generating Station 核電廠 .....	48
4.2 歐洲核電廠地下水防護經驗.....	56
4.3 南韓月城核電廠.....	63
4.4 南韓 Kori 核電廠.....	71
<b>第五章 結論與建議 .....</b>	<b>77</b>
5.1 結論.....	77
5.2 建議.....	79
<b>參考文獻 .....</b>	<b>80</b>
<b>附件、歷次工作會議審查意見回覆 .....</b>	<b>81</b>

# 第一章 計畫目的與工作

## 1.1 計畫緣起與目的

本服務案名稱為「核電廠地下水防護管制廠址模型及監測作業技術要項研析」，依據工作說明書所書列的「問題背景」說明依據核子反應器設施管制法，核能電廠設備與設施應足以保障公眾健康及安全，對於環境保護及生態保育之影響合於相關法令規定。我國核電廠在運轉期間已建立廠址地下水傳輸概念模式與防護監測方案，進入除役期間仍須持續執行該方案，透過監測廠區地下水輻射狀況，掌握廠址是否有發生放射性核種外釋情事，以立即採取防範地下水污染或外釋擴大之應變處理措施。

為研析我國核電廠除役期間廠址地下水防護管制特性，核能安全委員會(簡稱核安會)108年至112年委託研究計畫已就核電廠廠址水文地質參數、地工特性參數等進行探討，並逐年對核一、二、三廠地下水傳輸模式與防護監測方案進行檢視，亦蒐集國際核電廠相關案例經驗，作為我國核電廠地下水防護管制之基礎。

台電公司除役計畫規劃我國核電廠除役作業於25年內完成，在此期間內核電廠須持續執行地下水防護方案，掌握廠址內及周圍環境之地下水變化狀況，確認除役作業無放射性物質污染地下水之疑慮。參照

美國核能業界導則，核能電廠地下水防護方案應定期檢視更新，管制單位有必要了解及掌握核電廠地下水防護方案之廠址模型建置及地下水監測等相關專業技術資訊，並持續蒐集及彙整國際核電廠地下水防護管制資訊，以精進我國核電廠地下水防護方案審查及管制之技術能力。

## 1.2 計畫工作內容

依本服務案工作說明書所說明計畫執行期間將於決標日起至 113 年 12 月 31 日止執行完成。本案委託研究內容如下：

- (一)參考國際相關文獻，研析核能電廠地下水防護方案廠址概念模型建置要項，提出管制單位審查、視察之建議事項。
- (二)參考國內外相關文獻，研析核能電廠地下水防護方案地下水監測井建置及測試要項，提出管制單位審查、視察之建議事項。
- (三)蒐集國際核能電廠地下水防護實務案例或管制作法，彙整研析重點事項，提出可供我國核能電廠地下水防護作業之管制建議。

### 1.3 計畫報告章節說明

本報告分為五章，分別說明如下。

第一章為「計畫目的與工作」，主要說明計畫緣起與目的、計畫工作內容與計畫報告章節組成。

第二章為「核能電廠地下水防護方案廠址概念模型建置要項」，主要內容為廠址概念模型定義與建置流程、EPRI 1016099 指引對於建立廠址概念模型的導則及廠址概念模型建置要項評析。

第三章為「核能電廠地下水防護方案地下水監測井建置」，主要包括廠址特徵分析與地下水監測，監測井設計、建置與試驗，EPRI 1016099 指引的監測井建置導則，台灣環境部地下水水質監測井設置作業原則及監測井建置要項評析。

第四章為「國際核電廠運轉與除役期廠址地下水防護實務經驗」，主要包括加拿大 Bruce Nuclear Generating Station 核電廠，歐洲核電廠地下水防護經驗及南韓月城核電廠。

第五章為「結論與建議」，主要總結整個計畫的執行工作，並在核能電廠地下水防護方案廠址概念模型建置要項與、核能電廠地下水防護方案地下水監測井建置、國際核能電廠的地下水防護經驗與未來可行工作相關建議。

## 第二章 核能電廠地下水防護方案廠址概念模型建置要項

### 2.1 廠址概念模型定義

廠址概念模型（Site Conceptual Model，SCM）是針對特定廠址系統的概念性描述假說，目的是系統化呈現該廠址的地下環境條件，協助專業人員了解地下水污染物的外釋、遷移與潛在影響受體。作為一種簡化的真實世界的描述，廠址概念模型通常以文字或圖解形式呈現，並包含了污染物在地下水遷移的物理、化學和生物過程及其所處的環境條件，如圖 2-1 所示。根據 EPRI (2008) 的定義，廠址概念模型是一套統一的假說，用於描述污染物在環境中的釋放途徑、遷移模式及最終歸宿，幫助專業人員評估和預測廠址狀況並制定相應行動方案。SCM 涵蓋了廠址水文地質背景、污染源位置、主要污染物特性、地下水遷移方式，以及其對人類和生態受體的可能影響。

藍字表示概念水文地質過程  
棕字表示概念水文地質物理架構

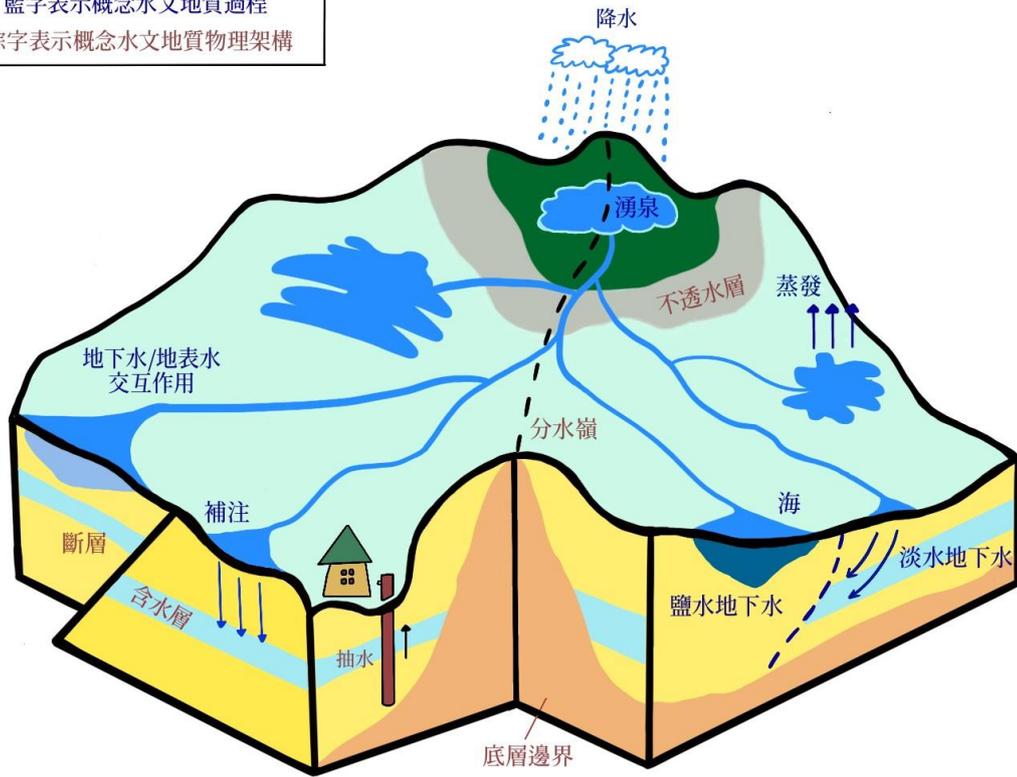


圖 2-1 廠址概念模型

廠址概念模型的三大組成要素包括物理架構、水文過程及化學交互作用。首先，物理架構描述了廠址的地質材料分佈與地下水流動的物理結構；其次，水文過程探討於地下水流場的流向與速度；最後，化學交互作用涵蓋了污染物在地下水中與地層的物理、化學及生物反應，進而影響其在環境中的傳輸和宿命。儘管 SCM 無法精確呈現所有現地細節，但其提供的框架可與數學模式或物理模式相結合，用以分析和模擬污染物在系統內的行為。

廠址概念模型的建構是一個分階段的動態過程，並非一成不變。隨著廠址相關的水文地質資料（如地質調查鑽井、地下水水位變化、污染物濃度的時空變化等）和地質知識（包括地質洞察力和專業地質解釋）的不斷累積，廠址概念模型應進行持續的檢驗與更新，這即是所謂的互動式廠址概念模型建構過程（Enemark et al., 2019）。在這個過程中，廠址概念模型需經過資料的驗證與校準，從初始版廠址概念模型（initial site conceptual model）逐步演進至第二、第三、第四代等更新版本。

## 2.2 廠址概念模型建置流程

廠址概念模型的建置流程包括多個步驟，每個步驟皆涵蓋了主要資訊來源、行動措施、審查程序與審核追蹤(audit trail)的範例，以確保模型建構的完整性和準確性。以下為各步驟的詳細說明：

### (1) 設定目標

主要資訊來源：委託者需求、主管機關要求、研究目的，以及相關政策文件、法律與法規。

行動措施：定義研究所需的元素，確定提供的資訊符合需求，並在計畫開始前進行詳盡的審查。

審查程序：在計畫開始前與管制機關和/或委託者進行詳盡審查。

審核追蹤：會議紀要、與委託者或管制機關的信件/電子郵件、與委託者達成的聲明文件等。

### (2) 地形與地表水系

主要資訊來源：公開發表的地形圖。

行動措施：辨識廠址周邊水體特徵，評估集水區的邊界，確定地表水與廠址的交互影響。

審查程序：將現地觀測與地圖資訊進行比對，以確認地表特徵的正確性。

審核追蹤：圖資清單、現地調查紀要。

### (3)地質

主要資訊來源：地形圖、地質圖、報告和鑽探記錄等公開資料。

行動措施：分析與解釋地質資料，辨識資料之間的差距並了解其潛在影響。

審查程序：根據資料建立初始概念模型，以便在後續步驟中進行進一步檢驗。

審核追蹤：圖資清單、現地紀要等文件。

### (4)含水層架構

主要資訊來源：步驟 2 和 3 的資料、抽水試驗報告以及其他公開資料。

行動措施：確認現地試驗（如抽水試驗）和/或實驗室量測的需求，以更深入了解含水層結構。

審查程序：利用新收集的資料持續更新並完善概念模型。

審核追蹤：含水層清單、抽水試驗紀錄、實驗室量測證明、數據分析與解釋報告。

### (5)地下水流

主要資訊來源：地圖和鑽探記錄資料，整合步驟 2、3、4 的結果。

行動措施：確定模型中需進一步補充資料的位置，並統一校正所有資料至相同的絕對高程基準。

審查程序：基於新資料進行模型檢核，並使用計算模型測試地下水流動的合理性。

審核追蹤：觀測井孔清單、地下水位量測數據。

#### (6)含水層互相關係

主要資訊來源：來自步驟 2、3、4 和 5 的資料，並考慮計算模型的初步結果。

行動措施：評估地下水位與各含水層及地表水體之間的相互關係。

審查程序：利用新資料檢核概念模型，並使用計算模型進行模擬測試。

審核追蹤：資料清單、計算模型的執行記錄，包含流網、假設列表及輸出摘要。

#### (7)水平衡

主要資訊來源：影響水文地質的長期降水記錄、蒸發和河川流量資料。

行動措施：利用水平衡計算來估算可用地下水資源的數量和質量。

審查程序：基於新資料對概念模型進行檢核，並利用計算模型測試水

平衡。

審核追蹤：水平衡計算所用資料(數據)的副本。

#### (8)模型描述

應用措施：利用建置完成的概念模型評估廠址的環境影響，或在必要時進一步根據計算模型進行模擬，以預測可能的環境影響。

審查程序：使用所有步驟的數據與模擬結果不斷檢視和修正概念模型。

審核追蹤：概念模型的完整書面描述，輔以圖示與從步驟 1 至 8 所得資料。

該流程包含了詳細的資料來源與審查程序，以確保概念模型的準確性和可靠性，並持續更新以反映實地狀況的變化。

## 2.3 EPRI 1016099 指引的建立廠址概念模型導則

EPRI 1016099 指引為核能業者提供針對符合廠址水文地質特性的地下水防護方案的完整指導。地下水防護方案的目標是控制放射性物質洩漏，減少核電廠運作過程中不在規劃範圍內的污染排放，並降低長期潛在地下污染的成本。EPRI 1016099 指引提供了各個階段的詳細工作程序，從系統性與實務可行的角度，涵蓋核電廠地下水防護方案的設計、執行導則及技術細節。

EPRI 1016099 指引採取兩階段地下水防護方案，第一階段是風險評估與減緩措施，第一階段目的是評估並瞭解核電廠的系統、結構與組件（System, Structure, and Components, SSC）對廠址土壤或地下水污染的風險。此階段中需全面評估廠址地下水污染的現有風險及潛在風險，並優先採取任何減緩行動以減少污染風險。第二階段為基準地下水監測方案，第二階段提供實施綜合基準地下水監測方案（Comprehensive Baseline Groundwater Monitoring Program）的導則，包括發展廠址概念模型、監測井設置、以及監測資料的分析與詮釋。若已掌握現有或潛在地下水污染風險，指引建議可採取進一步的工具和方法作為地下水監測升級（Graded Approach）的一部分，以全面瞭解廠址的水文地質。EPRI 1016099 指引主要包括下列章節：

## 1. Introduction 前言

概述地下水防護方案的重要性與指引範圍。

## 2. Graded Approach for the Groundwater Protection Program 分級地下水防護方案

提供基於風險分級的地下水防護策略。

## 3. Evaluation of Potential Subsurface Releases 潛在地表下外釋評估

評估潛在地表下污染物洩漏的風險。

## 4. Establishing a Site Conceptual Model 建立廠址概念模型

為地下水監測設計發展廠址概念模型，以便了解污染源與遷移途徑。

## 5. Locating, Installing and Testing Groundwater Monitoring Wells 地下水監測井的位置選定、設置與試驗

提供監測井設置的規劃、位置選擇和測試方法，確保監測的有效性。

## 6. Establishing a Groundwater Sampling and Analysis Process 建立地下水採樣與分析過程

規範地下水樣品的採集與實驗室分析流程。

## 7. Evaluating Sampling and Monitoring Data 評估採樣和監測數據

分析與評估監測數據，以便了解污染物的濃度變化趨勢。

## 8. Program Validation and Review 方案驗證與審查

定期審查和驗證方案的有效性，並在必要時進行調整。

## 9. Communication with Stakeholder and Regulators 與利益相關者以及監管單位溝通

透明地與管制單位及利益相關者分享方案進展和監測結果。

## 10. Potential Mitigating Actions 潛在減緩行動

針對檢測到的污染情況，提供可行的減緩措施。

以下就「4 建立廠址概念模型」進行說明：

### 4.1 Developing the Initial Site Conceptual Model 發展初版廠址概念模型

導則說明 4.1：應基於現有資料發展初版廠址概念模型。

使用廠址運營歷史資料，識別潛在污染來源、電廠配置和水文地質特性。

初版概念模型為非數值模型，用於初步假設污染源可能的釋放位置、遷移方式及其對人類健康和環境的潛在影響。

透過廠址概念模型可以支持初始監測井配置，以收集數據驗證初步假設的有效性。

### 4.2 Aerial Photos and Engineering Drawings 航測照片和工程圖

導則說明 4.2：應檢視建廠時的航測照片和工程圖，參考地下設施如管道、導管和其他結構，以確保其與地下水流向無衝突。

記錄可能影響入滲和污染物遷移的構造，例如不透水表面和壓實土壤區。

航測照片和工程圖可協助建立廠址三維圖，並視覺化展示地下結構的影響。

#### 4.3 Previous Hydrogeologic Reports 先前的水文地質報告

導則說明 4.3a：應參考廠址的先前水文地質報告，瞭解地質特性。

報告中描述的地下水流向、地層材料和傳輸速率，對預測污染傳輸範圍和速度具有參考價值。

導則說明 4.3b：若監測井設置於前期水文地質調查時應確認其符合當前標準，作為地下水防護計畫的一部分。

#### 4.4 Potential On-Site and Off-Site Receptors of Groundwater

Contamination 潛在的廠內和廠外地下水污染受體

導則說明 4.4a：確認鄰近水源用途（如飲用或灌溉），包括廠內與鄰近物業的地下水源。

即使該水源目前未使用，也應假設其未來可能作為飲用水源，納入防護範圍。

導則說明 4.4b：編制並定期更新廠內與臨近水井、湧泉的用途、位置

和出水量。

導則說明 4.4c：確認廠址下游是否有濕地或河口，並考量放射性污染對生態系統的影響。

#### 4.5 State and Local Regulations 州和地方法規

導則說明 4.5：查核地下水污染物適用的州和地方法規，尤其是背景濃度要求及生態風險評估標準，以確保操作符合法規要求。

#### 4.6 Preliminary Estimates of Groundwater Flow Characteristics 地下水流特性初步評估

##### 4.6.1 Groundwater Elevation 地下水高程

導則說明 4.6.1：評估地表水與地下水位的高程分布，並透過地形圖、鑽孔資料初步繪製地下水位等高線，以確認地下水流方向。

##### 4.6.2 Pre-Operational Groundwater and Geological Data 運轉前的地下水和地質資料

導則說明 4.6.2：透過運轉前的地質研究，瞭解廠址地下水的流向及流速。

##### 4.6.3 Regional Hydrologic Characteristics 區域水文地質特性

導則說明 4.6.3a：應參考州與聯邦地質調查，獲取當地地質及含水層的分布資訊。

## 4.7 Site-Specific Groundwater Flow Profile 廠址特定的地下水流剖面

### 4.7.1 Well Installation 井的設置

使用調查井與監測井收集水文地質數據，以建立廠址特定的地下水流況。

### 4.7.2 Horizontal Distribution and Movement 水平方向的分布與流動

導則說明 4.7.2：透過水位觀測確定污染物水平流動範圍。

### 4.7.3 Vertical Distribution and Movement 垂直方向的分布與流動

導則說明 4.7.3：若淺層含水層發現污染，需增加監測井並檢查垂直污染範圍。

## 4.8 Measurement of Physical Parameters 量測物理參數

### 4.8.1 Water Level Transducers 水位傳感器

導則說明 4.8.1：使用水位傳感器以記錄水位變化並分析水力梯度。

### 4.8.2 Geophysical Testing 地球物理試驗

導則說明 4.8.2：若地質複雜可採地球物理方法測試含水層特性。

### 4.8.3 Hydraulic Conductivity Testing 水力傳導性試驗

導則說明 4.8.3：進行抽水試驗估算水力傳導性，並確保污染水的妥善管理。

## 4.9 Fate and Transport Numerical Modeling 宿命傳輸數值模式

導則說明 4.9：若確認地下水污染，應考慮建立宿命傳輸數值模型以預測污染物濃度隨時間和空間的變化，提供污染團範圍的可視化展示。

## 2.4 廠址概念模型建置要項評析

有關於廠址概念模型建置要項評析的項目主要可分為以下幾項：

### 概念模型初版：

概念模型主要是對特定區域的地質、地下水及環境特徵的整體描述，因此在對於廠址進行相關評估，需根據過去與現有的基本資料，建置初版的概念模型。

### 基本資料：

在廠址基本資料的分類上，可分為地形、航測、區域地質與遙測影像。**地形**主要為利用航測資料繪製區域的地表高程與坡度圖，了解地形對於水流可能的影響。**航測**為利用航空攝影等技術獲取高解析度地面影像，提供地形和土地利用的資料。**區域地質**則是透過分析區域的地質圖了解不同地層、斷層及岩石種類的分佈。**遙測影像**是使用衛星或無人機收集的遙測影像，識別植被覆蓋、水體及人類活動影響。

### 地質架構：

地質架構為描述區域內岩層的排列和結構，可進一步了解岩石種類、當時沉積的環境和地質年份，是理解地下水流動及污染傳輸的重要依據。

### 鑽孔岩心代表性：

概念模型的建置需要有足夠涵蓋目標區域內主要地質單元和異質性特徵的鑽孔岩心資料，並透過專家分析確保所取樣岩芯資料的代表性。此外須根據廠址面積的大小來規劃鑽孔數量，廠址面積越大則需要更多鑽孔數量，具體數量可根據地質異質性進行調整。

#### **補充調查與更新版本：**

根據初版模型的建置，假使過程中有新資料的蒐集或是廠址有新事件的發生，需進行補充調查以獲取更多數據，並不定期更新模型以反映最新現地廠址的情況。

#### **降雨：**

利用近期氣象站觀測的降雨量資料，收集降雨量大小與其空間上的分佈，評估對地下水位升降變化與水質的影響。

#### **地下水位監測**

透過自記水位計密集量測地下水位隨時間下變化，同時可分析季節性和降雨事件對地下水位的影響。

#### **地下水流向與流速：**

對於廠址的地下水流向與流速大小瞭解相當重要，尤其在建廠前後的變化差異都須進一步比較以了解廠址設施或建物對地下水系統的影響，而這些變化可以通過長期的水位觀測和相關模式模擬來了解。

### **地下水水質監測:**

在廠址可能潛在污染區域設置監測井，定期進行水質取樣和分析，分析地下水中的污染物濃度，以確保水質符合標準。

### **土地利用:**

在廠址周圍需評估土地利用的情況，包括農業、工業和人類居住區的分佈，了解人類活動對地下水系統的影響。

### **可能受體:**

須了解可能受到地下水質和水量變化影響的受體，包括生態系統、人類健康及經濟活動，並考慮這些受體可能存在的暴露途徑，進行風險評估。

## 第三章 核能電廠地下水防護方案地下水監測井建置及測試要 項

### 3.1 廠址特徵分析與地下水監測

廠址特徵分析(site characterization)目標是建立概念模型了解污染源強度和位置以及污染物隨時間與空間的遷移與轉化，目的為優化監測策略並發展有利且具成本效益的整治方案，廠址特徵分析需進行廠址地下環境特性的現地和實驗室分析。廠址特徵分析的過程首先要確立特徵分析的目標，不同目標的分析過程與重點也不會完全相同。廠址特徵分析可能有多個目的，而這些目的可能彼此相關。為了更有效地管理潛在污染問題，應進行全面的廠址特性分析；雖然可能需要較高的成本，但清楚了解現地情況，有助於後續制定精準的整治計畫從而降低整治成本。

廠址特徵分析有許多不同方法，包括階段性或漸進性方法和適應性管理技術。對地下污染性質範圍甚少了解的廠址，第一步是收集和分析廣泛的潛在污染物，再根據這些早期調查結果進行縮小和聚焦。

廠址特徵分析與監測應注意的原則包括：(1)廠址特徵分析投入的資源能節省數倍投入整治成本；(2)不夠謹慎監測設備安裝和操作可能會造成交叉污染和污染物遷移的短路，使原本的環境問題變得更惡化；

(3)在進行特徵分析前應明確界定特徵分析的目標；(4)特徵分析應從非侵入性方法（不會明顯擾動廠址地下環境的方法）開始，以便優化後續的侵入性方法（例如監測井的安裝）；由外往內調查可以減少器具污染與污染物擴散；(5)分階段調查可以調整監測策略；與(6)地下水採樣、安裝監測井和收集地下水樣本的侵入性的方法目的是從含水層中獲取具有代表性的水樣本。

地下水監測井主要用於收集地下水的代表性水樣進行檢驗分析，以了解監測井設置位置的含水層地下水水質狀況。地下水監測井網的設置是監測廠區地下水輻射狀況以掌握廠址是否有發生放射性核種外釋，可以立即採取防範地下水污染或外釋擴大之應變處理措施。EPRI 1016099 指引「5 地下水監測井的位置選定、設置與試驗」對於相關監測井設置提供相關工作的導則說明。

### 3.2 監測井設計、建置與試驗

監測井設計、建置與試驗包括下列要項：

#### 1. 確定用途

在設計監測井之前，必須首先應確定監測井的用途，因為這將決定設計的所有細節。監測井的主要目的包括：(1)測量地下水位高程（非受壓含水層）或測量含水層內的壓力水位面（受壓含水層）；(2)收集地下水水質樣本進行化學分析；(3)測試不同深度含水層或不透水層的滲透性；(4)提供地球物理儀器放置的空間；(5)收集土壤氣體樣本。因此，不同用途的監測井會在井管直徑、井篩長度和位置、以及圍封材料等方面有不同設計。

#### 2. 井深與井管設計

安裝監測井時會進行地質鑽孔，並可能收集岩心樣本以了解當地的地質情況，決定目標含水層位置。鑽孔直徑需大於井管直徑，以便於安裝井管，井的深度應達到所需的目標含水層的底部，井管直徑需大於取樣設備儀器以方便放入，但不應大於最低要求太多，以避免過多的抽水量。因為，在進行取樣前，需要抽除井管內的積水，井管直徑越大，所需抽取和處理的水量就越多，因此需要在功能與成本之間取得平衡。

### 3. 井管材料選擇

監測井井管和井篩的材料選擇需考慮監測井的預期用途、地下水的化學成分以及所關切的污染物類型，常用材料包括 PVC、不鏽鋼及 HDPE，材料的耐腐蝕性能至關重要，以免地下水水樣受到材料的化學影響。

### 4. 井篩設置

井篩是井管中允許含水層地下水進入的部分，一般可在 PVC 管上切割均勻間隙的開縫來實現，通常位於目標含水層內，井篩的篩縫寬度應根據目標含水層的顆粒特性設計，確保水流通暢而不帶入細顆粒。篩縫過大會導致泥沙進入井內，影響水質和設備運行；篩縫過小則可能限制地下水流入井的速率，無法有效取樣。井篩的設計應確保能夠涵蓋地下水位的季節性變動範圍，當水位變化時仍可提供足夠的水樣量。若需多深度取樣，則可安裝多個獨立的井篩段，以獲取不同深度的地下水水樣。

### 5. 濾料層

若含水層中含有大量黏土或細顆粒沙質，井篩外圍需填充濾料層，

通常為乾淨的石英砂，以穩定天然形成物並防止泥沙進入井中，並促進地下水流入井篩確保水樣的代表性，濾料級配應適當，避免井孔塌陷並確保水力效果。

## 6.環狀空間密封

為防止地表水向下滲入至井篩和濾料層位置，在濾料層上方的環狀空間須進行密封，常用材料包括膨潤土、純水泥漿及含有粉狀膨潤土添加劑的水泥漿。密封材料需具低滲透性，應確保在井管與天然地層間良好結合，並在安裝後膨脹以達到密封效果。此密封層還可以防止地下水在不同含水層間垂直移動，隔離各取樣區域，確保樣本不受外界污染。

## 7. 保護井管設計

為防止監測井受到物理損壞或人為破壞，通常會在井管外安裝帶鎖的保護鋼套管或井室，保護套管需有足夠的直徑和高度，以便水文地質學家可以順利操作，保護套管通常延伸至地表水泥層以增強固定性，並避免異物或污染物進入井中。

## 8.定期維護與檢測

監測井建置完成後，需定期進行維護，檢查井篩與井管的密封狀況，並校正取樣設備，以確保監測數據的準確性與一致性。井內積水與泥沙須定期清理，以防影響取樣品質。

藉由以上監測井設計、建置與試驗以及維護原則，監測井可提供準確、穩定的地下水水質資料，作為環境監測與污染管理的科學依據。

### 3.3 EPRI 1016099 指引的監測井建置導則

EPRI 1016099 指引章節中的第五章說明地下水監測井的位置選定、設置與試驗 (Locating, Installing and Testing Groundwater Monitoring Wells)，以下分別敘述說明。

#### 5.1 Data Quality Objectives for Well Drilling 鑽井資料品質目標

導則說明 5.1：考慮建立和記錄鑽井的資料品質目標 (data quality objectives, DQO) 流程，美國環保署 (US Environmental Protection Agency, USEPA) 文件「DQO 流程導則」中的 DQO 流程，是一指引管理人員或員工有效地取得環境資料的方法，此流程提供了一系列清晰的步驟，協助相關人員以最適當的資源完成資料收集。資料品質目標的重點為確認需要收集多少資料以及資料的準確程度，以確保足夠用來設計和評估相關方案。

以下項目須藉由 DQO 流程確定並記錄：

- 每口井的目的
- 每口井的設計目標
- 設置每口井的位置和深度的理由
- 從每口井收集的土壤和地下水樣本的類型
- 擬進行的分析類型

- 調查資料的預期用途

## 5.2 Well Installation Considerations 井設置考慮事項說明

### 5.2.1a：記錄監測井建置細節

對井建置細節的了解有助於評估從監測井中所取得樣本的分析結果

- 鑽井方法
- 總井深度
- 井在含水層的開篩深度間距(井篩區)
- 井中地下水的大致深度
- 井篩區附近的任何濾材的類型和厚度
- 將井篩區與上方或下方地層完全隔離的任何阻水材料的類型和厚度
- 鑿井工法

導則說明 5.2.1b：建立資料庫供收集和使用井的建置的資料，以確保總結果可被記錄、保留和方便檢索。以下元素應該被考慮用於資料庫或試算表的工具：

- 使用 American Nuclear Insurer (ANI) Information Bulletin 80-1A 中描述的過程，維持在一個位置，由核能相關部門記錄定期進行備份。

- 為各種層級的用戶明確建立資料庫清楚讀寫的權限。
- 如果資料庫中包含的資料可更改，則應保存更改的記錄。

導則說明 5.2.2：審查州和地方機構的法規確定鑽探地下水監測井的管轄要求。

- 在許多州當鑽井時必須提交列出監測井具體施工細節的許可證，當監測井永久停用，也必須提交許可證。在某些情況下，鑽井或永久停用井必須由在該州取得許可的鑽井承包商。

導則說明 5.2.3：根據廠址概念模型與每一 SSC 和工作實務的評估結果決定井的位置。

- 優先考慮地下水監測的地下水採樣點(SSC)附近和下游位置設置一個或多個監測井，以確定可能由漏洩、溢出或未經分析的通路導致的地下水影響。若有兩個或更多“高優先級”SSC 靠近位置，一個位於它們下游位置的監測井可能足以確定是否有泄漏。如果通過地下水監測確認了污染，可能需要額外的井來確定哪個 SSC 是來源。
- 最少需要三口井來描述理論“地下水位面”，並推斷地下水流向。地形和場地地層學的變化將影響地下水流動，並影響確定感興趣區域地下水和污染物流向變化所需的井的數量。

- 將井設置在來自源頭的污染物流動路徑上對於識別來源至關重要。然而，在非固結土壤(unconsolidated soil)中，地下水流動會橫越流動前緣，通常導致向下游位置擴散的污染帶。出於這個原因，通常可以將井的位置偏移十英尺(3 米)或更多，以避開公用事業、建築物和其他障礙物，同時仍然提供有用於追蹤污染帶的數據。這種普遍性在裂縫岩層流域中適用性較小，因為污染物流動在不允許廣泛流動前緣擴散的離散裂縫系統中進行。裂縫走向可能與主導的地下水流向不同。
- 如果場地的水文地質剖面顯示，用於飲用水的水井位於業主所屬土地範圍內或外，且落在潛在地下水污染團的流動路徑上，監測井應該設置在飲用水井的上游位置，以避免受到污染影響；同時，監測井也應位於可能污染源的下游位置，方便觀察污染源對地下水的潛在影響。此設置原則可有效保護飲用水安全，並持續監控污染狀況。

導則說明 5.2.4: 確認監測井安裝是否有足夠的直徑以進行適當的採樣。

- 大約超過 25 英尺(7.6 公尺)深的井通常需要 2 英寸(5.1 公分)直徑的套管，以允許使用沉水泵，對於深度超過 100 英尺(30.5 公尺)的井或容納多區域採樣器可能需要更大直徑的井。

### 5.3 Monitoring Well Construction 監測井建造

導則說明 5.3a: 在合格的地球科學家/工程師指導下安裝並記錄監測井。

- 許多州頒發專業地質學家的執照或證書。這些專業人士可以被視為符合導則目的的合格監督地球科學家。在沒有州立法要求的情況下，一位合格的監督地球科學家/工程師應具有地球科學相關學科的四年大學學位和/或相關專業經驗，包括調查地下水污染，包括監測井的設計、安裝和使用。

導則說明 5.3b: 按照公認的標準建置和維護調查井與監測井

- 公認的標準包括有關設置監測井的州指引或規定，ASTM D5092-04 “Standard Practice for Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells” ， ASTM D5978-96(2005) “Standard Guide for Maintenance and Rehabilitation of Ground-Water Monitoring Wells” ， USEPA “Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells”
- 須注意避免提供原本不存在的兩層間水力連通的通道，使得混入不同層的地下水。除了地下水採樣區外，井篩和井管之間的環形空間必須在整個井孔的整體深度上適當阻隔。依照認可的施工和維護標準將有助於確保從井中所的樣本是含水層條件的代表樣本，並且由樣本分析所得的資料是正確的。

導則說明 5.3c：安裝適當尺寸和深度的調查井和監測井，並在最有可能受到工廠排放影響的區域內設置篩選區間。

導則說明 5.3d：在鑽探調查井和監測井時，對貫穿過的地質材料進行取樣、檢查和記錄。

- 在鑽井過程中，檢查貫穿地層的地質材料有助於了解地下的地層結構，這些結構會影響地下水流動以及污染物於廠址下方的傳輸情況。收集的樣本可用於放射性核種的檢測，也可進一步測試其土壤特性，如孔隙率、密度、顆粒大小分佈、含水量和有機碳含量。透過比較放射性核種在土壤和水的濃度，可決定廠址特定的分佈系數 (Kd) 值。
- 這些參數在代表當地含水層材料時非常有用。例如，土壤孔隙度和顆粒大小可用於計算水力傳導率。然後可以使用水力梯度和計算的水力傳導率來計算地下水的平均線性速度 (average linear velocity)，並估算最具移動性的污染物到達指定合規點（例如廠址邊界）所需的傳輸時間。

導則說明 5.4a：制定並實施監測井的維護計劃

- 通過破損的井筒或未正確封閉的地表完工，地表水可能進入監測井，可能污染當地地下水或改變其化學特性。為確保從監測井採

樣的地下水代表井附近含水層的水質，必須定期檢查井筒和地表完工的完整性，並及時進行任何必要的維修。

- 受污染的地表水也可能通過管道和公用事業電桿等穿透不透水表面（如混凝土或柏油鋪面）進入地下水。這些受污染的水可能影響附近的監測井。需要謹慎確保通常不透水表面的穿透處得到適當封閉。
- 如果要依靠地下水樣本的分析結果來建立關於地下水污染的是否存在的意見，無論監測井的類型如何，確保進行施工和維護實務的品質是必要的，
- 藉由直接貫入方法建置的調查井的安裝過程雖然與其他方法不同，但要防止地表水入滲，要準備井口保護，並確認井深隨時間推移保持一致（以呈現井篩沒有充滿砂土）通常對所有類型的監測井都是必要。根據 ASTM-5978 採樣對井的理化性能進行採樣和趨勢分析。

#### 5.4 Maintenance Program for Monitoring Wells 監測井的維護計劃

導則說明 5.4b：使用有執照的鑽井承包商或在合格的地球科學家/工程師指引下建置監測井地表完工。

導則說明 5.4c：地下水監測計畫中，應納入所有井的完井檢查工作

並製作文件，作為正式且有記錄的檢查流程。

導則說明 5.4d：依據標準不再使用於預期目的之除役監測井。

若地下水監測井已不再具備原本的監測用途，應根據相關標準進行廢棄處理。廢井標準法規來自州政府的環境保護部門(或相應機構)提供的規範，或者 ASTM 5299-99 中的指導原則，確保廢棄的井不會對環境或地下水造成潛在風險。

### 3.4 台灣環境部地下水水質監測井設置作業原則

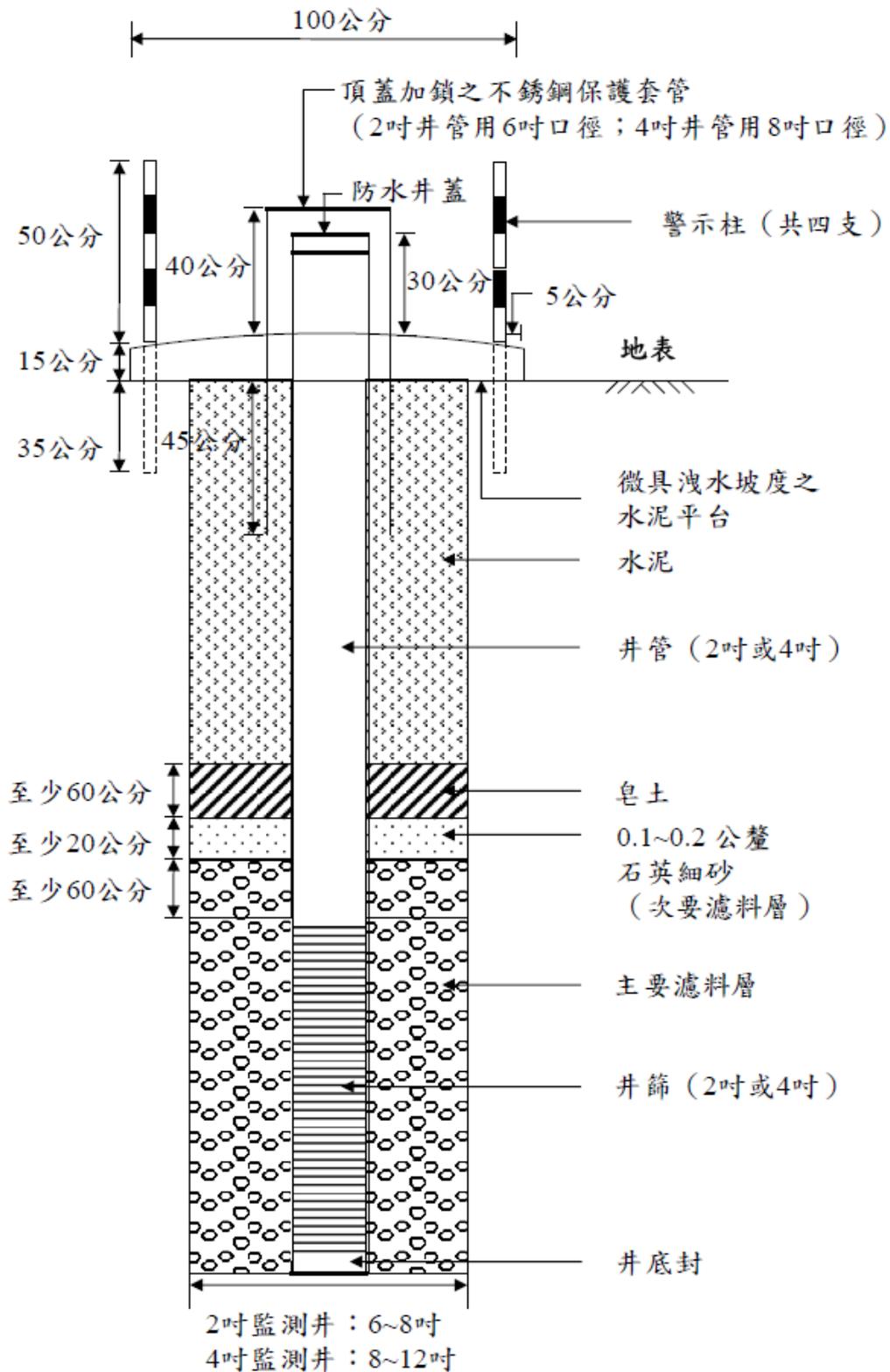
為加強地下環境的長期監控和污染防治，環境部(行政院環境保護署改制)依據《水污染防治法》與《土壤及地下水污染整治法》之規定，針對飽和含水層地下水水質監測的需求，制定了地下水水質監測井設置作業原則。

此作業原則提供了監測井設置的標準化指引，以確保監測井在規劃、設置、運作和管理過程中符合品質和目標要求，可取得代表性水樣以正確反應地下水的水質狀況；當地下水污染事件發生時，亦有助於掌握潛在污染源，從而及時進行風險管理。以下就地下水水質監測井設置作業原則簡要說明：

- **監測井設置目的與分類：**地下水水質監測井依據不同目的分為區域性監測井（監測背景水質）及污染防治相關監測井（預防、調查、查證）。
- **設置規劃人員資格：**監測井設置規劃人員需具備特定專業資格（如水利、地質、環工等相關專業），或經高等考試或技師考試通過並有設井經驗者。
- **設置前之規劃與評估：**包括監測井設置及設計說明、井址勘查資料、水文地質資料蒐集、設置方法及材料，並避免設置於不利於監測的

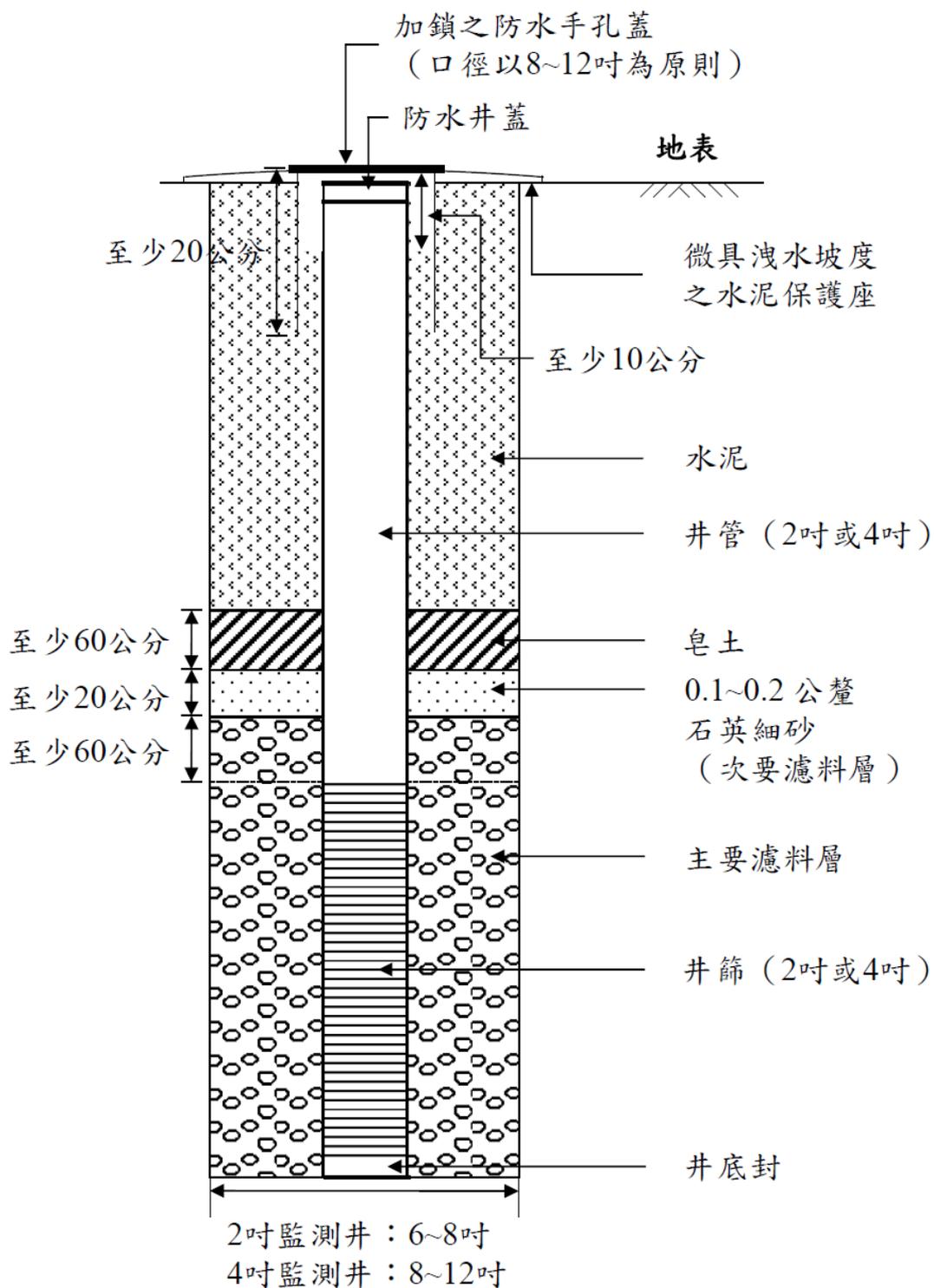
設施附近。

- **監測井設置與構造規範：**設置過程需符合監測井構造(如圖 3-1 及圖 3-2)、土壤採樣、井孔鑽鑿深度及井篩位置(如圖 3-3)、井管規格、濾料填實、封層及完井處理等標準。監測井的外觀如圖 3-4，監測井井篩篩縫寬度及濾料粒徑則依據粒徑分析資料決定，如表 3-1 所示。
- **監測井施工後管理與資訊保存：**施工完成後應清理、復原場地，並將相關資料輸入土壤及地下水管理資訊系統，且不得違規移作其他用途。



註：圖中尺寸長度註明者為建議尺寸；井篩和井管長度未註明者，依地質狀況及含水層型態而定。

圖 3-1 平台式監測井示意圖 (未按比例)



註：圖中尺寸長度註明者為建議尺寸；井篩和井管長度未註明者，依地質狀況及含水層型態而定。

圖 3-2 隱藏式監測井示意圖 (未按比例)

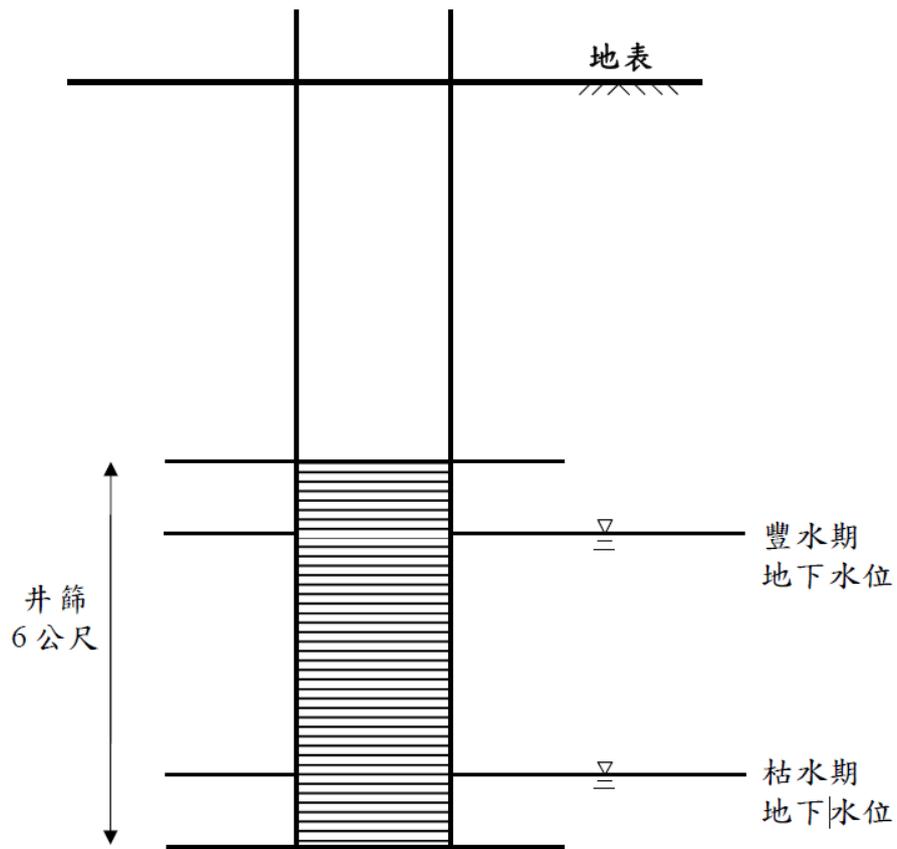


圖 3-3 非受壓含水層在豐水期和枯水期鑽孔深度及井篩位置示意圖（未按比例）



平台式監測井



隱藏式監測井

圖 3-4 地下水監測井的外觀

圖片來源: <https://www.ntepb.gov.tw/sub/news/Details.aspx?Parser=9,18,288,274,,14566,,,5> · [https://www.miaoli.gov.tw/News\\_Content2.aspx?n=285&s=198776](https://www.miaoli.gov.tw/News_Content2.aspx?n=285&s=198776)

表 3-1 濾料粒徑、含水層土壤粒徑與篩縫寬度的相關性

含水層土壤 D <sub>50</sub> (公釐)	濾料粒徑 (公釐)	美國標準篩 篩號範圍	篩縫寬度	
			英吋	公釐
0.063~0.125	0.25~0.425	#60 ~ #40	0.005	0.125
0.125~0.25	0.425~0.85	#40 ~ #20	0.01	0.25
0.25~0.5	0.85~2.00	#20 ~ #10	0.02	0.5
0.5~1.0	2.00~4.75	#10 ~ #4	0.04	1.0
1.0~2.0	4.75~9.50	#4 ~ 3/8-in	0.08	2.0
>2.0	4.75~9.50	#4 ~ 3/8-in	0.08	2.0

依據地下水水質監測井設置作業原則，完整的監測井設置程序須包括以下步驟：

### 1. 設置點位確認

確認設置位置之地籍資料，了解其附近地下管線、設施以及其他可能影響工作之條件。蒐集廠址周圍之水文地質資料，根據設置的目的進行監測井之相關設計，提出監測井設置規劃報告。

### 2. 銑孔及試挖

利用探管器、透地雷達等方式進行管線確認。以人工試挖方式挖至超過管線深度。

### 3. 土壤取樣

依廠址條件選擇合適之土壤取樣機具進行土壤取樣作業。

### 4. 土壤質地紀錄

土壤質地紀錄及粒徑分析，以利後續規劃開篩深度、範圍。

## 5. 井篩管及濾料

依據粒徑分析之結果來選擇合適之濾料(石英砂)。

## 6. 濾料填實

監測井管設置定位後，井篩及井管周圍由下而上回填濾料。井篩及其上端井管 60 公分處之外圍需用濾料填實，亦即濾料需自井底向上填充至超過井篩上部 60 公分。為避免濾料填充時形成之架橋或卡鎖現象。

## 7. 封層

井篩及其上端井管 60 公分處之外圍需用濾料填實(濾料層材料不得含有會使水質劣化之雜質)，濾料頂部再輸入至少 20 公分厚之 0.1~0.2 公釐石英細砂。細砂上 60 公分以丸狀或扁粒狀的皂土粒填實，皂土層上方填入水泥漿，其上再用波特蘭一號水泥填封至地表，以固定井管及防止地表滲漏影響。

## 8. 完井

完井方式可用汲取、湧水塞、氣提、超量抽水等方法。如地下水有污染之虞時，完井所汲出之地下水應妥善收集處理，避免污染物擴散或傳輸之可能性。

## 9. 水質量測

完井標準為出水的濁度小於 5 NTU (Nephelometric Turbidity Unit)；

若不能達到上述標準時，得以完井最後階段，每次間隔 10 分鐘，連續量測三次濁度小於 20 NTU 或變化±10%以內。

## 10. 高程座標量測

測量參考點應永久標示於井管上。坐標測量可使用衛星定位系統 (GPS) 或經緯儀測量，高程測量可採用水準測量、靜態 GPS 觀測法、即時動態 GPS 法 (RTK) 或其他精度更高之測量方法。

以下是針對「地下水水質監測井設置作業」較為詳細的描述：

### 1. 用途確定

在設計前應確認監測井的用途（如水位測量、水質樣本收集、滲透性測試），以確保井管直徑、井篩設置、圍封材料等設計細節符合需求。

### 2. 井深與井管設計

根據地質鑽孔結果確定井深和井管直徑，井管直徑需大於取樣設備，但不應過大，以平衡抽水量和成本。

### 3. 井管材料選擇

井管和井篩材料應考慮耐腐蝕性，以免影響水樣化學成分。常用材料包括 PVC、不鏽鋼和 HDPE。

#### 4.井篩設置

井篩應根據含水層顆粒特性設計篩縫寬度，以確保水流順暢且不帶入細顆粒，並涵蓋水位季節性變化範圍。多深度取樣時可設置多個獨立井篩段。

#### 5. 濾料層

在井篩外設置乾淨的石英砂濾料層，防止泥沙進入並促進水流入井篩，以確保水樣的代表性，濾料級配應適當以防井孔塌陷。

#### 6.環狀空間密封

使用低滲透性材料（皂土粒及含 5%皂土的水泥漿）密封濾料層上方空間，防止地表水下滲和含水層間垂直水流，確保樣本不受污染。

#### 7.保護井管設計

為防物理損壞或人為破壞，應在井管外安裝帶鎖的保護鋼套管或井室，確保取樣設備的安全性。

#### 8.監測井試驗

在監測井建置完成後進行測試，以確保井的功能性和設計符合預期用途，並檢測井內各層水質、滲透性等關鍵參數。

#### 9.定期維護與檢測

定期檢查井篩與井管的密封狀況，清除井內積水和泥沙，並校正取

樣設備，以保持數據的準確性和一致性。

## 10.水樣品質保證

定期檢測地下水水質，包括濁度和化學成分，確保水樣代表性，以提供穩定、準確的地下水水質資料作為環境監測和污染管理的科學依據。

### 3.5 地下水監測井建置及測試要項評析

以下就地下水監測井建置及測試要項進行評析。

#### 1. 制式監測井相關紀錄文件

根據環境部的要求，設置地下水水質監測井時，必須提供詳細且制式的紀錄文件。這些文件不僅要記錄井位及施工過程，還要包含地質岩心的照片。岩心照片可用於分析該區域的地質層次及特徵，便於後續評估水質變化與潛在污染源的影響。紀錄文件的完整性及準確性至關重要，以確保井設置符合監測標準並支持長期的環境評估。

#### 2. 洗井與完井

在監測井的施工過程中，洗井與完井是必要的步驟。洗井旨在清除鑽井過程中產生的細微泥沙與其他雜質，確保井水的清澈，進而準確反映地下水質。完井則是指完成監測井的最終施工，包括井管的安裝、封口以及相關設施的建置。洗井和完井工作需要依據環境標準進行，以避免引入污染並保障井內水樣的代表性。

#### 3. 監測井定期巡查

為了確保監測井的長期穩定性及有效性，必須定期進行巡查。巡查內容通常包括使用水井光學影像儀觀察井內部狀況，檢查井管的完整性和是否有沉積物堆積。影像檢查技術能有效捕捉井內可能的變化，提

早發現異常，防止潛在問題影響監測數據的準確性。

#### 4. 監測井維護

在使用期間，監測井的維護不可或缺。視井內情況，可能需要定期進行洗井以清除沉積物，或者採取其他必要的維護方法，如更換井管或密封材料等。適當的維護不僅能確保水質樣本的真實性，還能延長監測井的使用壽命，為持續的環境監測提供穩定的資料來源。此作業流程確保地下水監測井的設置、管理及維護符合環境部的標準要求，並能提供持續、可靠的地下水質監測數據，用以支持長期的環境管理與污染防治。

## 第四章 國際核電廠運轉與除役期間廠址地下水防護實務經驗

### 4.1 加拿大 Bruce Nuclear Generating Station 核電廠

加拿大 Bruce Nuclear Generating Station 核能電廠包括 Bruce Power A 和 Bruce Power B(分別簡稱為 BNGS A 和 BNGS B,統稱為 BNGSs) 是由 Ontario 電力公司 (Ontario Power Generation, OPG) 所擁有, 並由 Bruce Power 營運的加拿大重水鈾 (CANDU) 核能發電廠。Bruce Power 的建設始於 1968 年, 首批反應器 (Bruce A) 於 1970 年代初投入運營, 並陸續完成其餘兩座反應器。隨著 Bruce B 的建設完成, 新增了四座反應器, 使 Bruce Power 在 1980 年代末成為全球最大的核電廠之一。2000 年代初期, 核電廠面臨諸多挑戰, 包括安全問題和財務困境。許多反應器因維護和升級需求而停運。2005 年開始的重大翻修項目旨在增強電廠的安全性、效率和產量。此階段包括反應器更新和先進技術安裝, 以確保電廠能夠穩定運作。目前, Bruce Power 營運共 8 座反應器 (Bruce A 和 Bruce B 各 4 座), 並持續進行翻修, 以延長運營壽命並提升產能。

Bruce 核電廠的地下水保護計畫遵循加拿大標準協會 (Canadian Standards Association) N288.7-15 標準, 即「1 級核設施及鈾礦和鈾選礦廠的地下水保護計畫 (Groundwater protection programs at Class I nuclear

facilities and uranium mines and mills)」。該計畫基於概念廠址模型設計，其總體目標是藉由減少 Bruce 核電廠相關活動對環境的影響，保護地下水水質與水量，進而實現地下水作為資源的有效管理。地下水保護目標藉由設定具體目標來實現，這些目標是通過系統規劃過程制定的，並構成了計畫績效監控的基礎。計畫目標的績效評估至少每年進行一次，這有助於持續改進計畫，所有的地下水目標於 2022 年達成。

加拿大標準協會的核電相關標準為核設施營運商提供了一套相互關聯的要求和指引，用於管理設施和營運活動。加拿大標準協會(CSA) N286 系列標準提供健全管理實踐和控制措施的整體實施方向，而其他加拿大標準協會的核能標準則提供支持管理系統的具體技術要求和指引。

加拿大核安全委員會的 REGDOC-2.9.1 「環境保護：環境原則、評估與保護措施 (Environmental Protection: Environmental Principles, Assessments and Protection Measures)」，規定了與環境保護相關計畫的管制要求和期望。該文件指出，核許可持有人應根據其具體情況，採用分級方法實施地下水保護計畫，以(1)防止或減少核物質或有害物質外釋到地下水；(2)防止或減少物理影響因子對地下水最終用途的影響；(3)確認已採取充分措施來阻止、圍封、控制和監測在正常運轉下可能

發生的任何外釋和物理影響因子。加拿大標準協會的「N288.7 標準一級核設施及鈾礦和選礦廠的地下水保護計畫」於 2015 年發布，並於 2020 年再次確認。此標準的目的是提供促進地下水保護的要求和指導。其主要是針對地下水保護計畫的設計、實施和管理問題，並融入了加拿大及國際上的最佳實踐。遵循該標準將允許設施證明其不會因為地下水對環境或人類及非人類生物的健康與安全造成不合理的風險。

Bruce Power 自 1990 年代末期以來就已經實施了地下水監測計畫，在該廠址進行的幾次地下水調查中，已安裝了淺層和深層監測井，這些監測井在多個面向上用來了解和描述該廠址的水文地質特徵，並在某些情況下評估與不同廠址相關的關切污染物的存在或不存在。根據需要安裝了監測井，以應對和調查已知的地下問題，這也是 Bruce Power 主動實施的地下水監測計畫的一部分。該廠址內有 16 個歷史遺留區域，作為年度監測計畫的一部分進行監測。這些遺留區域的邊界是根據以往的調查結果確定的，並根據對地下水的潛在風險或過去曾影響地下水的事件而選定，儘管這些基礎設施可能已經被移除。因此，Bruce Power 已將歷史遺留的監測區域重新整合為一個較小的地下水監測區域集合。這些區域是根據 Bruce Power 概念廠址模型提供的資訊進行定義。該概念廠址模型考慮了所有可能導致關注污染物外釋的途徑和機

制，以及其對地下水系統可能造成的影響範圍。該廠址概念模型的開發考慮了以下幾個方面：

(1) 污染源和潛在釋放

通過識別潛在污染活動、可能的環境關注區域以及與這些活動和區域相關的關注污染物，確定污染源和潛在釋放點。

(2) 地下水流動系統

包括流動方向和水力梯度、水層結構單元以及污染物遷移。

(3) 終端受體和潛在途徑

包括人類受體、生態受體、地表水和其他可能不應接觸地下水的潛在受體。

(4) 地下水脆弱性

考慮覆蓋層的厚度以及水位線以上材料的滲透性。

(5) 現有控制措施

如溢出反應、次級圍堵措施以及現有的地下水監測計畫。

藉由上述這些綜合措施，Bruce Power 的地下水監測計畫持續確保廠址的環境安全，並在國際標準的指引下進行長期的地下水保護與管理。

自 2014 年起，針對位於發電廠另一側的監測井進行了採樣，以進

一步豐富輻射地下水監測計畫的數據。這些監測井通常在秋季取樣一次，但為了與多層監測井的計畫保持一致，現已改為每半年取樣一次。2022 年地下水採樣活動的品質評估是基於在 5 月 25 日至 5 月 31 日、6 月 1 日以及 10 月 13 日至 10 月 19 日收集的地下水樣本進行的。評估遵循了各項採樣方法要求以及美國環境保護署 2020 年發布的無機超級基金方法資料審查國家功能指南（EPA 2020a）和有機超級基金方法資料審查國家功能指南（EPA 2020b）的指導方針。分析結果是根據精確性、準確性、代表性、可比性和完整性等標準進行評估。資料品質評估涵蓋了 108 個正常地下水樣本、13 個地下水現場重複樣本、11 個現場空白樣本、13 個行程空白樣本，以及相關的實驗室品質控制樣本。

資料品質評估是對資料是否達到資料品質目標的評估，其目的是確保已收集足夠數量的代表性樣本，並且分析所得的資料能夠支持項目的決策過程。

傳統的地下水採樣方法，在春季採樣事件（以及前幾年的採樣事件）中，使用了「井體積法」。此方法要求抽取 3 倍監測井的井體積地下水，或者將地下水井中可合理取得的水全部抽空，以確保採樣的地下水能真實代表含水層的地下水。需監測現場化學參數評估並確定地下水已達到穩定狀態，從而確保取得的水樣具有代表性。在秋季採樣工作，

監測井使用「低流量」技術進行抽水和採樣，即以較低的流速進行抽水，並頻繁記錄現場化學參數的測量值(每 3 到 5 分鐘一次)。現場化學穩定參數包括溫度、電導度、pH 值、氧化還原電位和溶氧，這些參數會在抽水過程中藉由現場儀器進行記錄。當這些現場(水質)參數穩定時，便進行採樣，這顯示地下水狀況已穩定，水樣具有代表性。2022 年秋季，在採樣方法從井體積法改為低流量抽水/採樣後，選擇了 3 個位置進行方法重複採樣，這些位置過去曾在地下水監測中檢測到石油碳氫化合物。儘管觀察到的石油碳氫化合物濃度存在差異，低流量方法被證實更能反映石油碳氫化合物的溶解濃度。人們認為，在井體積法取樣中觀察到的較高濃度反映了由於井中水柱攪動導致的夾帶沉積物或不混溶產物的干擾，並未能代表純粹溶解的地下水濃度。因此，未來 Bruce Power 將繼續使用低流量取樣方法，因為這不僅能更準確地反映溶解濃度，還能減少需要處理的廢水量。

在 2022 年，Bruce Power 成功達成了所有地下水監測計劃的目標，符合加拿大核安全委員會(CSNC)的要求。根據 CNSC 的規定，Bruce Power 的地下水監測計畫需符合加拿大標準協會(CSA) N288.7 標準，以確保其設施在地下水保護計劃和監測計畫上的合規性。

採樣地點的選擇基於前一年的監測結果，並考慮了廠址操作活動

和對地下水的潛在風險。這些風險包括含有潛在污染物的系統、結構和組件的存在。藉由設置這些監測區域，Bruce Power 可以有效追蹤和評估地下水水質，並迅速應變可能出現的污染源。

持續監測地下水水位提供了推論地下水流向的必要資訊，有助於了解地下水流動特性，這些資訊對於有效地監測和管理地下水水質非常關鍵，藉由地下水監測計畫所收集的資料，Bruce Power 能夠持續評估地下水現況，並確保監測數據的準確性。

在 2022 年，共有 154 個地點進行了地下水流觀察、檢查和監測。這些數據提供了完整的地下水狀況評估，使 Bruce Power 能夠確保地下水資源不受其運營活動的影響並符合環保要求。地下水監測數據的評估在確保環境與人類健康安全方面具有重要作用。Bruce Power 遵循地下水評估標準，評估場地活動對地下水的潛在風險。2022 年秋季，進行了全氟和多氟烷基物質（PFAS）的採樣，並參照加拿大衛生部的飲用水指南來篩選數據，確保水質安全。此外，Bruce A 和 Bruce B 的受保護區域內每半年進行一次氫濃度監測，

總結 Bruce Power 對廠址的地下水監測和管理展現出嚴謹的承諾，以確保環境與人類健康的持續保護。通過持續監測地下水，尤其針對電廠運營過程中潛在風險(如氫排放、燃油儲存和變壓器運行等)的監控，

Bruce Power 及時掌握地下水的狀況，並對異常情況進行有效管理。針對過往廠址活動可能遺留的環境影響，該計劃持續進行監測，以確認污染物濃度是否持續下降，並確保未發生地下污染物的擴散。所有監測點均進行水位量測，驗證地下水的流向和水質穩定性。此外，監測數據將根據相關國際標準進行系統性評估，以評估地下水的環境風險和人類健康影響，確保廠址的運營不對周邊環境構成不必要的風險。此舉不僅展示了 Bruce Power 對地下水防護的高度責任感，更為核能電廠的可持續運營提供了環保保障。

## 4.2 歐洲核電廠地下水防護經驗

本計畫以西班牙及法國除役經驗相關文獻(Susana et al. ,2023)，進行歐洲核電廠地下水防護經驗研析，並提出地下水輻射環境監測建議。

核電廠拆除與除役（dismantling and decommissioning process, D&D）過程包含一系列的輻射監測計畫，以確保在拆除過程及最終除役階段中，周圍環境符合輻射安全標準。輻射監測的範疇涵蓋核電廠區域內外的輻射特徵，尤其著重於地下水水質，因為地下水是當地居民的潛在飲用水來源。D&D 過程的終點標示著廠址的無限制再利用，而其達成前須經過徹底的輻射評估。為防範不同核種污染地下水，此文獻研究亦探討在實驗室分析中所需的檢測極限，確保放射性核種在地下水中的活度濃度符合 DCGLs 標準。

本文獻聚焦於拆除與除役階段的地下水輻射監測，研究目的為針對核電廠運行及除役期間潛在外釋的放射性核種，提出適合的活度濃度標準與檢測極限，並從實際操作角度探討輻射特徵評估所需的分析方法與資源配置，以提供各階段地下水輻射監測的具體建議。

研究方法假設直接飲用受污染地下水，飲用水攝入放射性核種所產生的年有效劑量計算，是利用成人攝入劑量係數以及飲水量來計算，活度濃度水平計算公式為

$$E(50) = \sum_j e_j(50) \cdot A_j \cdot C_j \quad (4.1)$$

其中  $E(50)$  為年有效劑量，單位為  $\frac{mSv}{year}$ ； $e_j(50)$  為攝入放射性元素  $j$  的有效劑量係數； $A_j$  飲用水中放射性元素  $j$  的活度濃度，單位為  $\frac{Bq}{litre}$ ； $C_j$  表示成人飲用水的消耗率(假設成人每日飲用 2 公升)，單位為  $\frac{litres}{year}$ 。

檢測限值的取得是一複雜的計算過程，需將放射性活度濃度的不確定性納入考量，在此將計算過程做精簡並重點摘要。在設定飲用水中放射性濃度的檢測限度時，通常將其設定為相應活度濃度水平的 10%，以確保檢測結果具足夠的敏感性與準確性。檢測限值計算公式為

$$y^\# = y^* + k_{1-\beta} \tilde{u}(y^\#) \quad (4.2)$$

其中  $y^\#$  為檢測極限； $y^*$  為決策閾值，表示得到主要測量結果的概率條件； $k_{1-\beta}$  為標準常態分佈的  $(1 - \beta)$  分位數，且當量測值等於檢測極限時， $u$  是量測值的不確定性。

這種方式有助於在飲用水樣本的放射性濃度接近或低於標準活度濃度時，依然能有效檢測並評估其潛在風險，從而保障民眾健康。

核電廠及環境中可能的放射性核種來源可分為三個階段，分別說明如下：

1. **運轉前階段**：此階段建立核電廠周圍的環境輻射水平和基線資料，提供基本環境數據，用於預測對公眾的輻射劑量及對環境的外釋影響。有助於後續評估核電廠的影響，會考慮在核電設施 D&D 過程中預期的放射性核種清單，並描述可能的外釋途徑及預期外釋量。
2. **運轉階段**：放射性核種主要來源包括
  - **核燃料**：U-235、U-238、Pu-239 和 Pu-241 的裂變和中子捕獲會產生許多不同核種，這些核種透過放射性衰變過程產生其他活性核種。
  - **反應器結構材料**：主要放射性核種（如不鏽鋼和合金）是由少量 Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Zn、Zr、Mo 和 Ag 活化產生的，包含鋼材中的 Mn-54、Fe-55、Ni-59、Co-60、Ni-63、Nb-94、Ag-108m 和 Sb-125；以及鋼筋混凝土中的 H-3、C-14、Ca-41、Fe-55、Co-60、Ba-133、Eu-152 和 Eu-154，輕水反應器中子活化反應生成的主要放射性核素及其每兆瓦熱（MWth）的預期活度如表 4-1 所示。

- **冷卻水**：結構材料活化的產物以及 H-3，它由三元裂變和與冷卻水添加劑、水和空氣中的同位素發生的不同核反應產生。符合半衰期小於 24 小時、且不是惰性氣體的放射性元素列於表 4-2。

表中輕水反應器冷卻劑中的放射性核種與文獻實際記錄的外釋數據完全一致，文獻包含 DIRATA(放射性核種於大氣及水環境的外釋)、IAEAs's classic 1975，其研究結果和法國核電廠於 1965-2008 年間監測的釋出情況亦大致相同。

表 4-1 輕水反應器主要放射性核素及預期活度

Nuclide	Activity
	Bq MW <sub>th</sub> <sup>-1</sup>
H-3	4.3E+09
C-14	4.1E+08
Ca-41	2.9E+06
Mn-54	1.4E+08
Fe-55	4.2E+11
Ni-59	3.7E+09
Co-60	1.1E+12
Ni-63	3.7E+11
Nb-94	1.4E+07
Ag-108m	4.8E+08
Sb-125	5.3E+08
Ba-133	4.2E+05
Eu-152	1.9E+10
Eu-154	1.9E+09

表 4-2 不同反應器中流體的主要放射性元素的長期活度濃度

Nuclide	BWR water	PWR coolant	PWR secondary coolant
	Bq g <sup>-1</sup>	Bq g <sup>-1</sup>	Bq g <sup>-1</sup>
I-131	8.1E+01	7.4E+01	3.0E-03
Cs-134	1.1E+00	1.4E+00	6.3E-05
Cs-136	7.4E-01	3.2E+01	1.5E-03
Cs-137	3.0E+00	2.0E+00	9.3E-05
H-3	3.7E+02	3.7E+04	3.7E+01
P-32	1.5E+00	-	-
Cr-51	1.1E+02	1.1E+02	4.8E-03
Mn-54	1.3E+00	5.9E+01	2.4E-03
Fe-55	3.7E+01	4.4E+01	1.8E-03
Fe-59	1.1E+00	1.1E+01	4.4E-04
Co-58	3.7E+00	1.7E+02	7.0E-03
Co-60	7.4E+00	2.0E+01	8.1E-04
Ni-63	3.7E-02	-	-
Zn-65	3.7E+00	1.9E+01	7.8E-04
Sr-89	3.7E+00	5.2E+00	2.1E-04
Sr-90, Y-90*	2.6E-01	4.4E-01	1.8E-05
Y-91	1.5E+00	1.9E-01	7.8E-06
Zr-95	3.0E-01	1.4E+01	5.9E-04
Nb-95	3.0E-01	1.0E+01	4.1E-04
Mo-99	7.4E+01	2.4E+02	9.3E-03
Ru-103	7.4E-01	2.8E+02	1.1E-02
Ru-106, Rh-106m*	1.1E-01	3.3E+03	1.4E-01
Ag-110m	3.7E-02	4.8E+01	2.0E-03
Te-129m	1.5E+00	7.0E+00	2.9E-04
Te-131m	3.7E+00	5.6E+01	2.0E-03
Te-132	3.7E-01	6.3E+01	2.4E-03
Ba-140	1.5E+01	4.8E+02	1.9E-02
La-140	1.5E+01	9.3E+02	3.4E-02
Ce-141	1.1E+00	5.6E+00	2.3E-04
Ce-143	-	1.0E+02	3.7E-03
Ce-144, Pr-144*	1.1E-01	1.5E+02	5.9E-03
Np-239	3.0E+02	8.1E+01	3.1E-03

### 3. 拆除與除役(D&D)階段:可分為三階段

- 移除高活性燃料和組件（如控制棒）
- 去污、拆除並移除放射性物質、廢料及反應器結構
- 達到法規標準之物質須按法規進行管理，以確保無輻射超標

根據核電廠歷史數據，D&D 過程中測量到的放射性核種不同，依據不同階段可能出現的放射性核種列於表 4-3。其中西班牙的除役經驗裡，D&D 階段發現地下水中存在的核種有 20 種，以黃色方框標示。

表 4-3 核電廠及環境中可能的放射性核種

	$e_j(50)$ Sv Bq <sup>-1</sup>	ACL <sub>j</sub> Bq l <sup>-1</sup>	D <sub>y</sub> <sup>#</sup> Bq l <sup>-1</sup>	T <sub>1/2</sub> s	NPP stage
Ag-108m	2.30E-09	5.96E+00	5.96E-01	1.38E+10	D
Ag-110m	2.80E-09	4.89E+00	4.89E-01	2.16E+07	O
Am-241	2.00E-07	6.85E-02	6.85E-03	1.37E+10	D
Am-243	2.00E-07	6.85E-02	6.85E-03	2.33E+11	D
Ba-133	1.50E-09	9.13E+00	9.13E-01	3.33E+08	D
Ba-140	2.60E-09	5.27E+00	5.27E-01	1.10E+06	O
C-14	5.80E-10	2.36E+01	2.36E+00	1.80E+11	D
Ca-41	1.90E-10	7.21E+01	7.21E+00	3.16E+12	D
Ce-141	7.10E-10	1.93E+01	1.93E+00	2.81E+06	O
Ce-143	1.10E-09	1.25E+01	1.25E+00	1.19E+05	O
Ce-144	5.20E-09	2.63E+00	2.63E-01	2.46E+07	O
Cl-36	9.30E-10	1.47E+01	1.47E+00	9.53E+12	D
Cm-242	1.20E-08	1.14E+00	1.14E-01	1.41E+07	D
Cm-243	1.50E-07	9.13E-02	9.13E-03	9.12E+08	D
Cm-244	1.20E-07	1.14E-01	1.14E-02	5.72E+03	D
Co-57	2.10E-10	6.52E+01	6.52E+00	2.35E+07	D
Co-58	7.40E-10	1.85E+01	1.85E+00	6.12E+06	O
Co-60	3.40E-09	4.03E+00	4.03E-01	1.66E+08	O, D
Cr-51	3.80E-11	3.60E+02	3.60E+01	2.39E+06	O
Cs-134	1.90E-08	7.21E-01	7.21E-02	6.51E+07	O
Cs-135	2.00E-09	6.85E+00	6.85E-01	7.30E+13	O
Cs-136	3.00E-09	4.57E+00	4.57E-01	1.14E+06	O
Cs-137	1.30E-08	1.05E+00	1.05E-01	9.48E+08	O
Eu-152	1.40E-09	9.78E+00	9.78E-01	4.27E+03	D
Eu-154	2.00E-09	6.85E+00	6.85E-01	2.71E+08	D
Fe-55	3.30E-10	4.15E+01	4.15E+00	8.67E+07	D
Fe-59	1.80E-09	7.61E+00	7.61E-01	3.84E+06	D
H-3 b	1.80E-11	7.61E+02	7.61E+01	3.89E+08	O, D
I-129	1.10E-07	1.25E-01	1.25E-02	5.08E+14	O
I-131	2.20E-08	6.23E-01	6.23E-02	6.93E+05	O
La-140	2.00E-09	6.85E+00	6.85E-01	1.45E+05	O
Mn-54	7.10E-10	1.93E+01	1.93E+00	2.70E+07	O, D
Mo-93	3.10E-09	4.42E+00	4.42E-01	1.26E+11	D
Nb-93m	1.20E-10	1.14E+02	1.14E+01	5.09E+08	D
Nb-94	1.70E-09	8.06E+00	8.06E-01	6.31E+11	D
Nb-95	5.80E-10	2.36E+01	2.36E+00	3.02E+06	D
Ni-59	6.30E-11	2.17E+02	2.17E+01	2.40E+12	D
Ni-63	1.50E-10	9.13E+01	9.13E+00	3.11E+09	D
Np-237	1.10E-07	1.25E-01	1.25E-02	6.77E+13	D
Np-239	8.00E-10	1.71E+01	1.71E+00	2.04E+05	O
P-32	2.40E-09	5.71E+00	5.71E-01	1.23E+06	O
Pm-147	2.60E-10	5.27E+01	5.27E+00	8.28E+07	D
Pu-238	2.30E-07	5.96E-02	5.96E-03	2.77E+09	D
Pu-239	2.50E-07	5.48E-02	5.48E-03	7.61E+11	D
Pu-240	2.50E-07	5.48E-02	5.48E-03	2.07E+11	D
Pu-241	4.80E-09	2.85E+00	2.85E-01	4.52E+08	D
Sb-125	1.10E-09	1.25E+01	1.25E+00	8.71E+07	D
Sn-126	4.70E-09	2.91E+00	2.91E-01	3.15E+12	D
Sr-89	2.60E-09	5.27E+00	5.27E-01	4.37E+06	O
Sr-90	2.80E-08	4.89E-01	4.89E-02	9.09E+08	O, D
Ru-103	7.30E-10	1.88E+01	1.88E+00	3.39E+06	O
Ru-106	7.00E-09	1.96E+00	1.96E-01	3.21E+07	O
Ta-182	1.50E-09	9.13E+00	9.13E-01	9.90E+06	O
Tc-99	6.40E-10	2.14E+01	2.14E+00	6.67E+12	D
Te-131m	1.90E-09	7.21E+00	7.21E-01	1.08E+05	O
Te-132	3.80E-09	3.60E+00	3.60E-01	2.79E+05	O
U-232	3.30E-07	4.15E-02	4.15E-03	2.23E+09	D
U-233	5.10E-08	2.69E-01	2.69E-02	5.02E+12	D
U-234	4.90E-08	2.80E-01	2.80E-02	7.75E+12	D
U-235	4.70E-08	2.91E-01	2.91E-02	2.22E+16	D
U-236	4.70E-08	2.91E-01	2.91E-02	7.39E+14	D
U-238	4.50E-08	3.04E-01	3.04E-02	1.41E+17	D
Y-91	2.40E-09	5.71E+00	5.71E-01	5.06E+06	O
Zn-65	3.90E-09	3.51E+00	3.51E-01	2.11E+07	O
Zr-95	9.50E-10	1.44E+01	1.44E+00	5.53E+06	O

O:運轉階段  
D:拆除與除役階段

### 4.3 南韓月城核電廠

本計畫蒐集月城核電廠(Wolsong NPP)除役相關文獻(Kwon et al., 2022)並研析核電廠地下水防護經驗，此研究利用 RESRAD-ONSITE 進行月城 1 號機 DCGL 初步評估。

月城核電廠位於韓國慶尚北道慶州市，是南韓第一座商用加壓重水反應爐(PHWR)，預計 2024 年底提出最終除役計畫，並於 2026 年後取得除役許可，核電廠基本資訊及重要期程彙整於表 4-4。

表 4-4 月城核電廠重要期程

反應爐	形式	施工開始	運轉開始	停止運轉
月城1號機	加拿大重水鈾反應爐CANDU	1977.10.30	1983.4.22	2019.12.24

研究利用 RESRAD-ONSITE 軟體對月城核電廠的土壤進行初步評估，得出濃度指引水平 (DCGL)。通過 RESRAD-ONSITE 的機率分析功能，針對輻射暴露劑量結果進行輸入參數不確定性的影響分析，以確保評估結果的可靠性。此外，對 RESRAD 中使用的各變量進行敏感性分析，評估其對輻射暴露劑量結果的影響，從而確認在輻射劑量計算過程中各參數對結果的相對貢獻，為後續核電廠除役後環境的輻射安全評估提供科學依據。

#### 關切污染物

文中關切放射性核種除了考量過去核電廠文獻曾出現的核種，亦

依據半衰期(>2 年)及相對分數(>0.01%)，而選定 14 個關切放射性核種，如表 4-5 所示。

表 4-5 導出初步濃度指引水平 (DCGL) 的目標放射性核種

Radionuclide	Relative Fraction of Radioactivity (%)	Decay Constant (s <sup>-1</sup> )
<sup>108m</sup> Ag	5.1	$5.26 \times 10^{-11}$
<sup>14</sup> C	2.5	$3.86 \times 10^{-12}$
<sup>60</sup> Co	7.6	$4.17 \times 10^{-9}$
<sup>134</sup> Cs	$7.9 \times 10^{-5}$	$1.06 \times 10^{-8}$
<sup>137</sup> Cs	$4.9 \times 10^{-5}$	$7.29 \times 10^{-10}$
<sup>55</sup> Fe	8.1	$8.03 \times 10^{-9}$
<sup>3</sup> H	$6.2 \times 10^{-2}$	$1.78 \times 10^{-9}$
<sup>93m</sup> Nb	1.5	$1.36 \times 10^{-9}$
<sup>94</sup> Nb	70.6	$1.08 \times 10^{-12}$
<sup>63</sup> Ni	1.2	$2.20 \times 10^{-10}$
<sup>125</sup> Sb	0.3	$7.97 \times 10^{-9}$
<sup>121m</sup> Sn	$1.2 \times 10^{-2}$	$5.01 \times 10^{-10}$
<sup>90</sup> Sr	$2.0 \times 10^{-2}$	$7.63 \times 10^{-10}$
<sup>93</sup> Zr	2.5	$1.44 \times 10^{-14}$

### 地質概念模型

為了建立地下水傳輸模式，需先建立廠址地質概念模型。月城核電廠所在地的主要地質構造為白堊紀岩石沉積層，其成分和結構受到火山活動、火山沉積物、斷層作用及侵入岩的影響，廠址地質概念模型如圖 4-1。沉積層的厚度在不同的核電廠機組有所差異，其中 2 號機組的沉積層厚度為 1-5 公尺，3 號機組為 6-15 公尺，4 號機組則為 6-12 公尺。地質特徵對地下水流動和放射性核種傳輸的影響非常重要，因此在進行傳輸模式的構建時，必須詳細考慮這些地質變量。

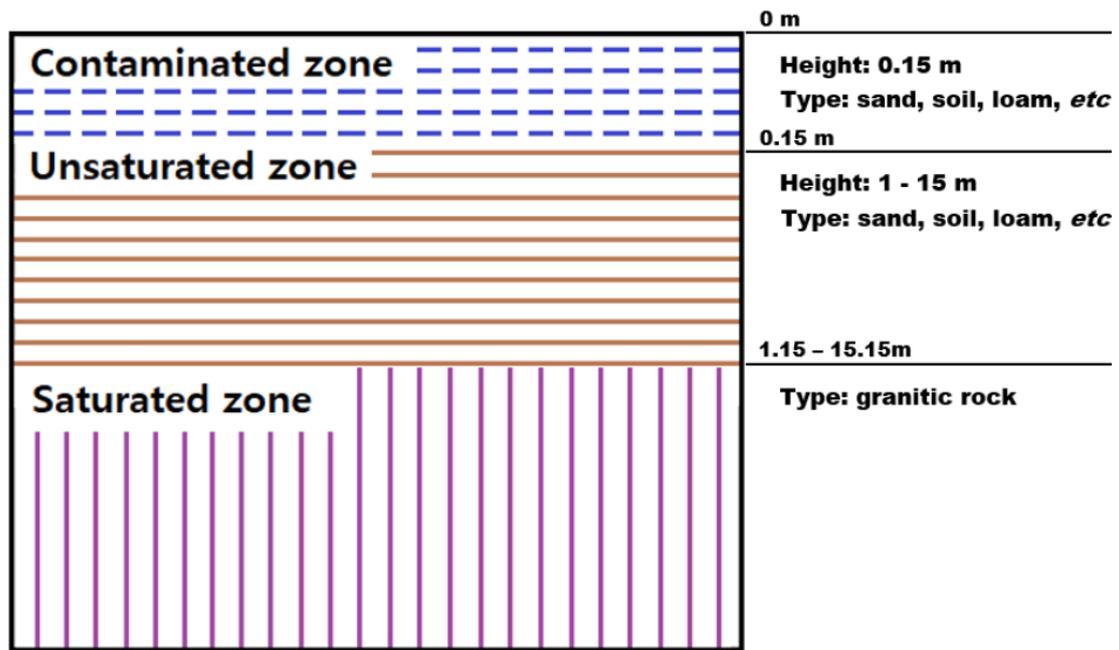


圖 4-1 月城核電廠廠址的地質概念模型

### 分配係數(Kd)

分配係數(distribution coefficient)定義為固體相與水溶液相間的比值，為預測放射性物質遷移及遲滯行為的主要參數。

各放射性核種的分配係數彙整於表 4-6。文獻中的 Kd 值參考自日本原子能機構吸附數據庫(JAEA-SDB)、月城核電廠地質概念模型及其地下水平均 pH 值，而根據國家地下水資訊中心提供的數據，月城核電廠附近地下水 pH 值平均為 5.83–8.40。

表 4-6 放射性核種的分配係數

Radionuclides	Zones	Log of Kd (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )
Ag	Contaminated zone Unsaturated zone	2.07 ± 0.65
	Saturated zone	2.03 ± 1.09 <sup>a</sup>
C	Contaminated zone Unsaturated zone	0.54 ± 0.59
	Saturated zone	0.0 <sup>b</sup>
Co	Contaminated zone Unsaturated zone	1.87 ± 0.71
	Saturated zone	2.65 ± 0.24
Cs	Contaminated zone Unsaturated zone	2.52 ± 0.99
	Saturated zone	2.03 ± 1.09
Fe	Contaminated zone Unsaturated zone	1.55 ± 0.80
	Saturated zone	1.55 ± 0.80
H	Contaminated zone Unsaturated zone	non-absorbable
	Saturated zone	non-absorbable
Nb	Contaminated zone Unsaturated zone	2.93 ± 0.48
	Saturated zone	2.41 ± 0.57
Ni	Contaminated zone Unsaturated zone	2.82 ± 0.65
	Saturated zone	1.80 ± 0.72
Sb	Contaminated zone Unsaturated zone	0.87 ± 0.55
	Saturated zone	3.05 ± 0.37
Sn	Contaminated zone Unsaturated zone	3.52 ± 0.70
	Saturated zone	3.20 ± 0.94
Sr	Contaminated zone Unsaturated zone	1.18 ± 1.03
	Saturated zone	0.58 ± 0.94
Zr	Contaminated zone Unsaturated zone	2.78 ± 0.50
	Saturated zone	2.62 ± 1.22

<sup>a</sup>: Kd value of Cs is applied based on the chemical analogy; <sup>b</sup>: deterministic value.

## 輸入參數

RESRAD-ONSITE 程式中，月城核電廠所需輸入的相關特性參數種類及數據如表 4-7 所列。參考依據包含國際核電廠除役案例、現地透水性試驗、廠址特定參數、南韓國內年度飲食報告及氣候數據量測資料等。

表 4-7 月城核電廠輸入參數列表

Parameter	Unit	Value
Area of contaminated zone	m <sup>2</sup>	49,518 [14]
Density of saturated zone	g·cm <sup>-3</sup>	2.6 [14]
Model for water transport parameters	-	non-dispersion [10]
Precipitation	m·year <sup>-1</sup>	1.1 [26]
Wind speed	m·s <sup>-1</sup>	2.5 [26]
Hydraulic conductivity in the saturated zone	m·year <sup>-1</sup>	15.8 [20]
Fruit, vegetable, and grain consumption	kg·year <sup>-1</sup>	286.4 [21]
Milk consumption	L·year <sup>-1</sup>	83.9 [22]
Meat and poultry consumption	kg·year <sup>-1</sup>	54.6 [23]
Fish consumption	kg·year <sup>-1</sup>	24.1 [24]
Other seafood consumption	kg·year <sup>-1</sup>	43.2 [24]
Drinking water intake	L·year <sup>-1</sup>	312.9 [25]

## DCGL 計算結果

依據 NUREG/CR-1757 建議，使用平均劑量峰值來推導 DCGL 值。針對非限制性再使用廠址的外釋標準進行計算，美國劑量標準為 0.25 mSv/y，南韓劑量標準為 0.1 mSv/y(若未能達標，則採用 1 mSv/yr)，計算結果如表 4-8。由表可知，DCGL 值由大至小依序為 <sup>93m</sup>Nb、<sup>55</sup>Fe、<sup>121m</sup>Sn、<sup>63</sup>Ni，應和其具有較大的 Kd 值及較短的半衰期有關

表 4-8 各放射性核種在不同劑量標準下的 DCGL 結果

Radionuclides	Regulatory Dose Limit	DCGL (Bq·g <sup>-1</sup> )	
		0.25 mSv·year <sup>-1</sup>	0.1 mSv·year <sup>-1</sup>
<sup>108m</sup> Ag		$2.56 \times 10^{-1}$	$1.02 \times 10^{-1}$
<sup>14</sup> C		$2.07 \times 10^0$	$8.27 \times 10^{-1}$
<sup>60</sup> Co		$1.73 \times 10^{-1}$	$6.90 \times 10^{-2}$
<sup>134</sup> Cs		$2.93 \times 10^{-1}$	$1.17 \times 10^{-1}$
<sup>137</sup> Cs		$6.65 \times 10^{-1}$	$2.66 \times 10^{-1}$
<sup>55</sup> Fe		$1.47 \times 10^3$	$5.87 \times 10^2$
<sup>3</sup> H		$1.88 \times 10^2$	$7.51 \times 10^1$
<sup>93m</sup> Nb		$5.63 \times 10^3$	$2.25 \times 10^3$
<sup>94</sup> Nb		$2.62 \times 10^{-1}$	$1.05 \times 10^{-1}$
<sup>63</sup> Ni		$5.03 \times 10^2$	$2.01 \times 10^2$
<sup>125</sup> Sb		$1.21 \times 10^0$	$4.86 \times 10^{-1}$
<sup>121m</sup> Sn		$6.01 \times 10^2$	$2.41 \times 10^2$
<sup>90</sup> Sr		$8.42 \times 10^{-1}$	$3.37 \times 10^{-1}$
<sup>93</sup> Zr		$6.75 \times 10^1$	$2.70 \times 10^1$

另外，本研究將所導出的月城核電廠廠址初步濃度指引水平(DCGL)結果與其他研究進行比較，如表4-9所示(單位為Bq/g)。為了在不同研究間建立相同比較標準，法規劑量標準統一為美國標準的0.25毫西弗/年。

比較發現，月城核電廠大部分核種與Koril號機得出的DCGL數值相對一致。另外，較高的Kd值影響阻礙污染物的遷移，會將污染物限縮在一範圍內，加上相對較短的半衰期，濃度會降低較快。

表 4-9 各放射性核種在不同研究中的 DCGL 結果比較

Cases	CY <sup>a</sup> [28]	Yankee Rowe [29]	Zion [30]	Kori-1 [13]	IAEA [31]	Wolsong (p.w.)
Methods	RESRAD v6.2	RESRAD v6.2	RESRAD v7.0	RESRAD v7.2	IAEA Standard	RESRAD v7.2
<sup>108m</sup> Ag	$2.60 \times 10^{-1}$	$2.70 \times 10^{-1}$	-	-	-	$2.56 \times 10^{-1}$
<sup>14</sup> C	$2.10 \times 10^{-1}$	$2.04 \times 10^{-1}$	-	$8.24 \times 10^0$	$2.50 \times 10^1$	$2.07 \times 10^0$
<sup>60</sup> Co	$1.40 \times 10^{-1}$	$1.48 \times 10^{-1}$	$1.74 \times 10^{-1}$	$2.10 \times 10^{-1}$	$2.50 \times 10^0$	$1.73 \times 10^{-1}$
<sup>134</sup> Cs	$1.70 \times 10^{-1}$	$1.85 \times 10^{-1}$	$2.78 \times 10^{-1}$	$3.60 \times 10^{-1}$	$2.50 \times 10^0$	$2.93 \times 10^{-1}$
<sup>137</sup> Cs	$2.90 \times 10^{-1}$	$3.18 \times 10^{-1}$	$5.81 \times 10^{-1}$	$8.20 \times 10^{-1}$	$2.50 \times 10^0$	$6.65 \times 10^{-1}$
<sup>55</sup> Fe	$1.01 \times 10^3$	$1.07 \times 10^3$	-	-	$2.50 \times 10^4$	$1.47 \times 10^3$
<sup>3</sup> H	$1.52 \times 10^1$	$1.37 \times 10^1$	-	-	$2.50 \times 10^3$	$1.88 \times 10^2$
<sup>93m</sup> Nb	-	-	-	-	$2.50 \times 10^2$	$5.63 \times 10^3$
<sup>94</sup> Nb	$2.60 \times 10^{-1}$	$2.74 \times 10^{-1}$	-	-	$2.50 \times 10^0$	$2.62 \times 10^{-1}$
<sup>63</sup> Ni	$2.68 \times 10^1$	$3.00 \times 10^1$	$1.48 \times 10^2$	$5.47 \times 10^2$	$2.50 \times 10^3$	$5.03 \times 10^2$
<sup>125</sup> Sb	-	$1.18 \times 10^0$	-	-	$2.50 \times 10^0$	$1.21 \times 10^0$
<sup>121m</sup> Sn	-	-	-	-	-	$6.01 \times 10^2$
<sup>90</sup> Sr	$6.00 \times 10^{-2}$	$6.29 \times 10^{-2}$	$5.29 \times 10^{-1}$	$1.75 \times 10^0$	$2.50 \times 10^1$	$8.42 \times 10^{-1}$
<sup>93</sup> Zr	-	-	-	-	$2.50 \times 10^2$	$6.75 \times 10^1$

### 非限制性再使用廠址外釋時間計算

為了計算核電廠除役後廠址無限制性再使用的時間，利用RESRAD-ONSITE程式計算總曝露劑量隨時間的變化，結果如圖4-2所示。假設受污染土壤中各種放射性核種的濃度為0.037 Bq/g (1 pCi/g)。滿足法規限值0.1毫西弗/年(根據韓國核安全與安全委員會公告第2016-33號規定，允許除役後廠址無限制性再使用)的時間為核電廠除役後4.07年，並進行最終廠址狀況調查。

另外，本研究亦根據各輸入參數的敏感性分析(以PRCC=0.25為標準代表相對較敏感的參數)，計算月城核電廠無限制性再使用廠址之外釋所需時間，結果如表4-10。由表可知，最敏感參數依序為外部伽馬輻射屏蔽係數(External gamma shielding factor)、受污染區域的密度(Density of contaminated zone)、蒸散發係數(Evapotranspiration coefficient)。

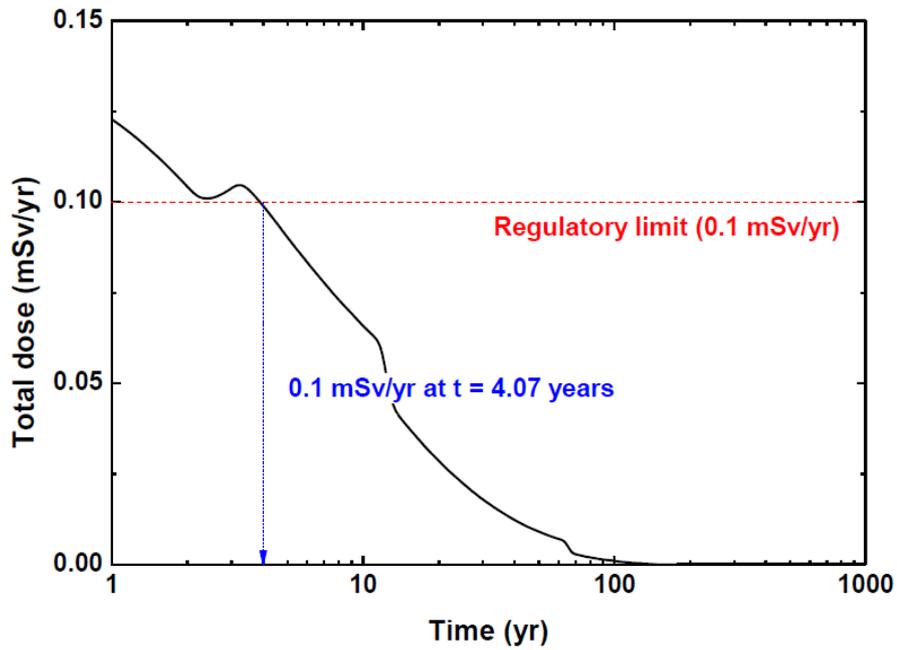


圖 4-2 總曝露劑量隨時間變化圖

表 4-10 依敏感性分析計算所得的再使用廠址外釋所需時間

Parameters	Multiplication Factor	Year for Site Release (Years)
External gamma shielding factor	upper ×2	7.14
	mid ×1	4.07
	lower ×0.5	- <sup>a</sup>
Density of contaminated zone	upper ×2	11.19
	mid ×1	4.07
	lower ×0.5	- <sup>a</sup>
Runoff coefficient	upper ×1.6	3.44
	mid ×1	4.07
	lower ×0.63	3.64
Kd of <sup>60</sup> Co in contaminated zone	upper ×2	4.56
	mid ×1	4.07
	lower ×0.5	1.96
Evapotranspiration coefficient	upper ×1.45	7.99
	mid ×1	4.07
	lower ×0.69	3.44
Kd of <sup>108m</sup> Ag in contaminated zone	upper ×2	4.56
	mid ×1	4.07
	lower ×0.5	3.44
Kd of <sup>134</sup> Cs in contaminated zone	upper ×2	4.07
	mid ×1	4.07
	lower ×0.5	4.07
Kd of <sup>90</sup> Sr in contaminated zone	upper ×2	4.31
	mid ×1	4.07
	lower ×0.5	3.85

#### 4.4 南韓 Kori 核電廠

在南韓核電廠分析中，本次報告同樣有研讀 KORI 核電廠最新的文獻，上一期的報告僅考慮居住農民與工廠工人兩種情境與廠址六個關切放射性核種。而本次報告閱讀的最新文獻 (Seo and Kim, 2023) 為同時考慮居住農民、工廠工人與核電廠設施三種情境與廠址 8 個關切放射性核種。

本文獻的主要目的為利用 RESRAD-ONSITE code 程式之劑量評估模式、選定關切核種與曝露途徑，來評估韓國核電廠址導出濃度指引水平(DCGL)，用以判斷廠址殘留放射性核種濃度是否符合外釋標準，並比較不同曝露途徑與敏感性參數對於三種情境評估結果的影響，分別為居住農民、工廠工人與核電廠設施，如圖 4-3 所示。

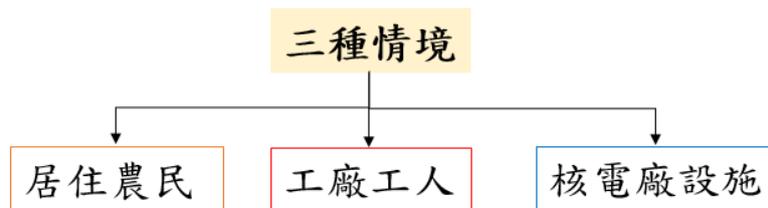


圖 4.3 考慮曝露途徑對於三種情境的評估

根據核安與安保委員會(NSSC)，除役完成後廠址和建築物的再使用標準規定，殘留放射性活度濃度造成的年輻射劑量不應超過 0.1 mSv。以 0.1 mSv 劑量限值作為計算結果之最終劑量，藉以計算出該外釋土

地中各放射性核種之濃度限值，即為各核種之導出濃度指引水平 (DCGL)。

有關各個再使用情境標準如表 4-11，由於核電廠設施為限制再使用區，因此在核電廠設施情境下，假使在採用 0.1 mSv/yr 的劑量標準未能達標時，才會再採用 1 mSv/yr 為劑量的標準。有關於不同情境考慮的暴露途徑如表 4-12，居住農民考慮了所有暴露途徑，是最保守評估。工廠工人情境排除了植物性食品、肉類、牛奶和魚類的途徑。核電廠設施情境則是在比工廠工人情境再少考慮飲用水的途徑。

表 4-11 三種再使用情境考慮的劑量標準

Input options for non-sensitive parameters by scenarios.

Site condition	Scenario	Dose criteria	Sensitive parameter value	Options for non-sensitive parameters
Unrestricted	Residential farmer	0.1 mSv/yr	•	•
Unrestricted	Industrial worker	0.1 mSv/yr	•	•
Restricted	Nuclear facility	0.1 mSv/yr + 1 mSv/yr (residential farmer) for restrictions failing	25 <sup>th</sup> (negative PRCC)	Distribution (Op 1)
			75 <sup>th</sup> (positive PRCC)	Default (Op 2)
				Median (Op 3)

表 4-12 不同情境所考慮的暴露途徑比較

Exposure pathways considered for scenarios [14].

Exposure pathway	Residential farmer	Industrial worker	Nuclear facility
External gamma	○	○	○
Inhalation of dust	○	○	○
Ingestion of plant foods	○	×	×
Ingestion of meat	○	×	×
Ingestion of milk	○	×	×
Ingestion of fish	○	×	×
Ingestion of soil	○	○	○
Ingestion of water	○	○	×

在 RESRAD 的參數分級中，主要根據參數在 dose 計算的相關性、改變參數值 dose 的變化性、參數的型態 (行為、代謝與物理)與資料可

取得難易度分為 priority 1, 2 與 3 三種等級，假使為 Priority 3 則會採用預設值，Priority 1 and 2 則會進一步採用機率式的分布。表 4-13 為不同情境考慮相對應暴露途徑下的參數與其分級。

在參數敏感性參數相關係數的分析中，如表 4-14，過去針對敏感性參數採用 **Partial Rank 相關係數 (PRCC)** 的標準是透過第一次 RESRAD 執行的結果 (PRCC) 絕對值等於或大於 0.25。本研究則採取 0.2 為標準代表相對較敏感的參數。工廠工人和核電廠設施情境分類的敏感參數相似，因為兩種情境中暴露途徑的差異在於地下水的攝取。

表 4-13 情境中考慮參數分級

Parameter	Priority	Scenario		
		Residential farmer	Industrial worker	Nuclear facility
Contaminated zone density	1	○	○	○
Contaminated zone erosion rate	2	○	○	○
Contaminated zone total porosity	2	○	○	○
Contaminated zone hydraulic conductivity	2	○	○	○
Contaminated zone b parameter	2	○	○	○
Contaminated zone distribution coefficient	1	○	○	○
Thickness of evasion layer of C-14 in soil	2	○	○	○
Unsaturated zone density	2	○	○	×
Unsaturated zone total porosity	2	○	○	×
Unsaturated zone effective porosity	2	○	○	×
Unsaturated zone hydraulic conductivity	2	○	○	×
Unsaturated zone b parameter	2	○	○	×
Unsaturated zone distribution coefficient	1	○	○	×
Saturated zone density	1	○	○	×
Saturated zone total porosity	1	○	○	×
Saturated zone effective porosity	1	○	○	×
Saturated zone hydraulic conductivity	1	○	○	×
Saturated zone hydraulic gradient	2	○	○	×
Saturated zone b parameter	2	○	○	×
Saturated zone distribution coefficient	1	○	○	×
Evapotranspiration coefficient	2	○	○	○
Runoff coefficient	2	○	○	○
Aquatic food contaminated fraction	2	○	×	×
Depth of soil mixing layer	2	○	○	○
Depth of roots	1	○	×	×
Wet weight crop yield for non-leafy plants	2	○	×	×
Weathering removal constant	2	○	×	×
Wet foliar interception fraction for leafy	2	○	×	×
Plant transfer factor	1	○	×	×
Meat transfer factor	2	○	×	×
Milk transfer factor	2	○	×	×
Bioaccumulation factor for fish	2	○	×	×
Mass loading for inhalation	2	○	○	○
Indoor dust filtration factor	2	○	○	○
External gamma shielding factor	2	○	○	○

表 4-14 各種情境考慮暴露途徑的參數相關性

Radionuclide	Scenario		
	Residential farmer (PRCC)	Industrial worker (PRCC)	Nuclear facility (PRCC)
H-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.77)</li> <li>Evapotranspiration coefficient (0.57)</li> <li>Runoff coefficient (0.81)</li> <li>Depth of roots (-0.96)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.81)</li> <li>Evapotranspiration coefficient (0.81)</li> <li>Saturated zone hydraulic conductivity (0.31)</li> <li>Saturated zone hydraulic gradient (0.22)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.95)</li> <li>Evapotranspiration coefficient (0.96)</li> </ul>
C-14	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.93)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.65)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.81)</li> <li>Kd of saturated zone (-0.30)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.95)</li> <li>Depth of soil mixing layer (-0.44)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.72)</li> <li>Density of contaminated zone (0.65)</li> <li>External gamma shielding factor (0.87)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.52)</li> </ul>
Co-60	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.60)</li> <li>External gamma shielding factor (0.92)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.47)</li> <li>Plant transfer factor (0.21)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.66)</li> <li>External gamma shielding factor (0.87)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.55)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.95)</li> <li>Depth of soil mixing layer (-0.98)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.24)</li> </ul>
Ni-63	<ul style="list-style-type: none"> <li>Depth of soil mixing layer (-0.35)</li> <li>Depth of roots (-0.84)</li> <li>Plant transfer factor (-0.92)</li> <li>Meat transfer factor (-0.24)</li> <li>Milk transfer factor (-0.60)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mass loading for inhalation (0.23)</li> <li>Depth of soil mixing layer (-0.98)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.23)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mass loading for inhalation (0.21)</li> <li>Depth of soil mixing layer (-0.98)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.24)</li> </ul>
Sr-90	<ul style="list-style-type: none"> <li>Depth of roots (-0.86)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.43)</li> <li>Plant transfer factor (0.94)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.28)</li> <li>External gamma shielding factor (0.79)</li> <li>Depth of soil mixing layer (-0.41)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.76)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.26)</li> <li>External gamma shielding factor (0.80)</li> <li>Depth of soil mixing layer (-0.43)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.79)</li> </ul>
Tc-99	<ul style="list-style-type: none"> <li>Evapotranspiration coefficient (0.29)</li> <li>Runoff coefficient (0.33)</li> <li>Depth of roots (-0.84)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.88)</li> <li>Plant transfer factor (0.92)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Saturated zone hydraulic conductivity (0.47)</li> <li>Saturated zone hydraulic gradient (0.38)</li> <li>Kd of unsaturated zone (-0.40)</li> <li>Kd of saturated zone (-0.63)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contaminated zone total porosity (0.37)</li> <li>Evapotranspiration coefficient (0.47)</li> <li>Runoff coefficient (0.54)</li> <li>External gamma shielding factor (0.35)</li> <li>Depth of soil mixing layer (-0.70)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.97)</li> </ul>
Cs-137	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.35)</li> <li>External gamma shielding factor (0.83)</li> <li>Depth of roots (-0.55)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.25)</li> <li>Plant transfer factor (0.69)</li> <li>Meat transfer factor (0.25)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.67)</li> <li>External gamma shielding factor (0.91)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.44)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Density of contaminated zone (0.67)</li> <li>External gamma shielding factor (0.91)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.40)</li> </ul>
Pu-241	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contaminated zone erosion rate (-0.33)</li> <li>Depth of soil mixing layer (-0.37)</li> <li>Depth of roots (-0.72)</li> <li>Plant transfer factor (0.68)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contaminated zone erosion rate (-0.63)</li> <li>External gamma shielding factor (0.40)</li> <li>Mass loading for inhalation (0.29)</li> <li>Depth of soil mixing layer (-0.85)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.46)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contaminated zone erosion rate (-0.73)</li> <li>External gamma shielding factor (0.32)</li> <li>Mass loading for inhalation (0.42)</li> <li>Depth of soil mixing layer (-0.87)</li> <li>Kd of contaminated zone (0.64)</li> </ul>

在計算過程中，如果為敏感的參數，則輸入單一值，非敏感參數則是套用(單一預設值、中位數、隨機分布)三個不同選項。

在放射性核種具有高劑量的情況下，DCGL 值將具有相對低值，表示放射性核種需要高度除污以釋放該廠址。當輻射劑量低時 DCGLs 值會較高，因此可以瞭解大多數放射性核種的初始劑量是最高的，也就是 DCGLs 較低。

在居住農民的情境中，DCGLs 計算經 1000 年後結果如圖 4-4，可以發現在三個選項中偏差最大的是 Pu-241，結果約為 6%。主要為 Pu-241 的特性較易透過 internal exposure 途徑，因此初期雖沒有顯著差異，但經一段時間後仍會計算出最低的 DCGL。在工廠工人的情境中，核種

H-3、C-14、Tc-99 和 Pu-241 自評估初期以來 DCGL 會有較低的結果。有關在核電廠設施的情境，在與主要以體外暴露途徑相關的放射性核種(例如 Co-60 和 Cs-137)，DCGL 在每個選項中限制失敗時都較小。最後還是需透過比較六種 DCGL 的情況來選擇更保守的結果。

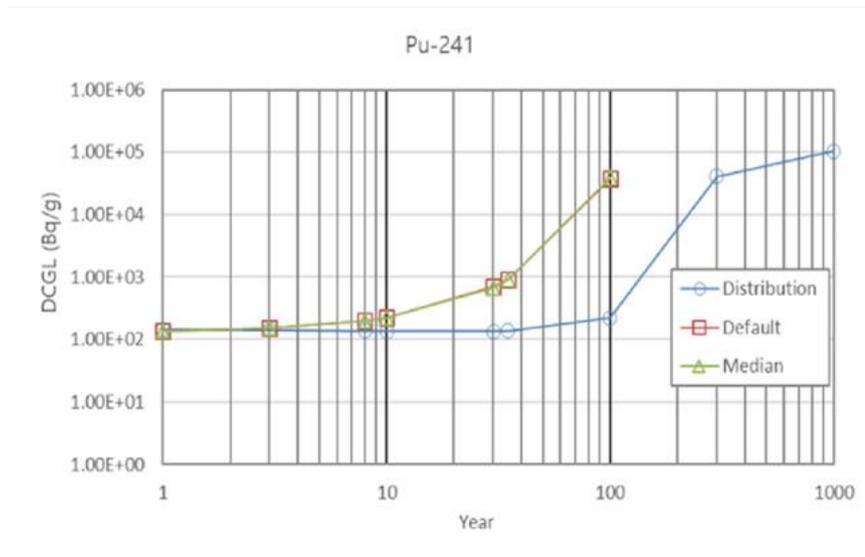


圖 4-4 在農住居民的情境 DCGLs 計算經 1000 年後不同參數設定的結果比較

針對非敏感參數採用(Distribution、Default、Median) 三種參數輸入方式對於不同情境 DCGLs 之差異比較列於表 4-15，計算的結果顯示 Co-60 具有最低的 DCGL 值，與之前的文獻評估結果相類似，其他放射性核種 DCGL 值由低至高大致依序為 Sr-90，Tc-99，C-14，Ni-63，H-3。

分析結果(圖 4-5)顯示，居住農民情境得出最小的 DCGL，工廠工人情境的 DCGL 則都較高。由於核電廠設施情境假設為限制再使用區，DCGL 是透過應用情境劑量和限制失敗的劑量準則推導出來的，再選取兩者中較為保守的結果作為最終的 DCGL，因此核電廠設施情境結果則是介於在最保守的居住農民情境和工業工人情境之間。

表 4-15 對非敏感參數採用三種參數輸入方式對於不同情境 DCGLs 之差異比較

Radio nuclide	Resident farmer			Industrial worker			Nuclear facility		
	Dis.	Def.	Med.	Dis.	Def.	Med.	Dis.	Def.	Med.
H-3	9.35E+01	9.32E+01	9.34E+01	1.21E+03	9.93E+02	1.20E+03	9.35E+02	9.32E+02	9.34E+02
C-14	5.32E-01	5.30E-01	5.31E-01	3.82E+04	2.71E+02	3.70E+04	5.32E+00	5.30E+00	5.31E+00
Co-60	6.80E-02	6.76E-02	6.91E-02	1.97E-01	1.96E-01	1.96E-01	1.97E-01	1.96E-01	1.96E-01
Ni-63	8.06E+01	7.98E+01	7.99E+01	8.00E+04	7.95E+04	7.94E+04	8.06E+02	7.98E+02	7.99E+02
Sr-90	9.26E-02	9.42E-02	9.29E-02	5.26E+01	5.26E+01	5.25E+01	9.26E-01	9.42E-01	9.29E-01
Tc-99	3.56E-01	3.47E-01	3.53E-01	5.78E+01	2.49E+01	4.87E+01	3.56E+00	3.47E+00	3.53E+00

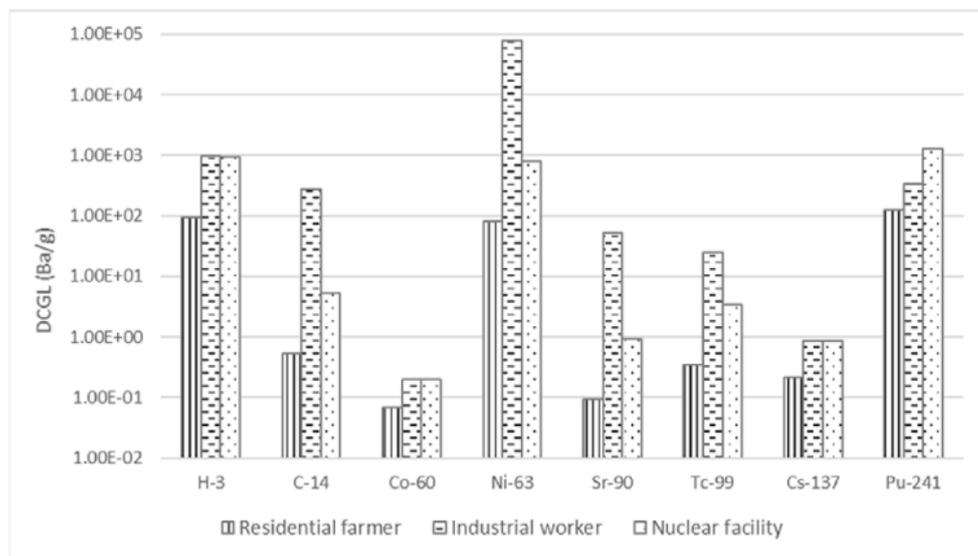


圖 4-5 對採用三種參數輸入方式對於不同情境 DCGLs 之差異比較

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

本計畫執行可以三個主要成果做為結論：

1. 本計畫針對廠址概念模型的定義與廠址概念模型建置流程進行說明，也針對 EPRI 指引建立廠址概念模型的導則進行解析，透過清晰的建置流程和 EPRI 指引建立廠址概念模型的導則說明，提出具體的建立廠址概念模型執行步驟，最終提出廠址概念模型要項評析。特別強調廠址概念模型的動態建構過程，隨著地質和水文資料的持續累積，模型可進行動態校準和驗證，這樣的互動式更新機制使得廠址概念模型 SCM 能更貼合真實廠址狀況。
2. 本計畫針對廠址特徵分析與地下水監測、監測井建置、EPRI 1016099 指引的監測井建置導則與台灣環境部地下水水質監測井設置作業原則詳細說明，並進行監測井建置要項評析，不管 EPRI 1016099 指引的監測井建置導則與台灣環境部地下水水質監測井設置作業原則都非常一致，且水質監測為地下水防護計畫的重要工作與長期目標。
3. 本計畫研析加拿大 Bruce Nuclear Generating Station 地下水監測方案的詳實過程，本計畫也研析歐洲核電廠除役相關文獻，也研析南

韓月城核電廠的 DGCLs 計算，同時也研析 Kori 核電廠的 DGCLs 計算新的發表論文，藉由國際的文獻的研析以提供管制單位掌握我國核電廠除役期間核電廠地下水防護的重要工作。

## 5.2 建議

1. 本計畫針對廠址概念模型的定義與廠址概念模型建置流程進行說明，建議核電廠廠址概念模型建置應參考國際導則及業界作法執行。
2. 環境部「地下水水質監測井設置作業」有制式監測井相關紀錄文件、洗井與完井、監測井定期巡查與監測井維護等要求，建議地下水監測井的設置、管理及維護應參考相關規定及要求辦理，俾能提供持續、可靠的地下水水質監測數據，用以更新各核電廠的地下水防護計畫。
3. 加拿大 Bruce Power 對廠址的地下水監測和管理展現出嚴謹的承諾，通過持續監測地下水，尤其針對電廠運營過程中潛在風險的監控，Bruce Power 及時掌握地下水的狀況，針對過往廠址活動可能遺留的環境影響，該計劃持續進行監測，以確認關注核種濃度是否持續下降，並確保未發生地下污染物的擴散。所有監測點均進行水位量測，驗證地下水流向和水質穩定性。監測數據根據相關國際標準進行系統性評估，確保廠址的運營不對周邊環境構成不必要的風險，展示了 Bruce Power 對地下水防護的高度責任感，更為核能電廠的可持續營運提供了環境保障。建議核電廠地下水防護計畫的維護及更新，應參考國際業界之優良實務。

## 參考文獻

- Bruce Power. (2023, April 24). Environmental Protection Report 2022. Retrieved from <https://www.brucepower.com/uploads/2023/04>
- Enemark, T., Peeters, L. J., Mallants, D., Batelaan, O., 2019. Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *Journal of Hydrology*, 569, 310-329.
- EPRI (Electric Power Research Institute), 2008. Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants (Report No. 1016099). Final Report, Jan. 2008.
- Kwon, C. G., Ahn, S., Lee, J. Y., 2022. Preliminary Evaluation of Derived Concentration Guideline Level for Surface Soil at Wolsong NPP Site Using RESRAD-ONSITE Code. *Applied Sciences*, 12(7), 3659.
- Petisco-Ferrero, S., Idoeta, R., Rozas, S., Olondo, C., Herranz, M., 2023. Radiological environmental monitoring of groundwater around NPP: A proposal for its assessment. *Heliyon*, 9(9).
- Seo, H. W., & Kim, H., 2023. The effect of sensitive and non-sensitive parameters on DCGL in probability analysis for decommissioning of nuclear facilities. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(10), 3559-3570.
- 環境部主管法規查詢系統:地下水水質監測井設置作業原則。113年11月6日，取自：<https://oaout.moenv.gov.tw/law/LawContent.aspx?id=GL006777>。

## 附件、歷次工作會議審查意見回覆

「核電廠地下水防護管制廠址模型及監測作業技術要項研  
析」案

第一次工作會議審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	有關核能電廠地下水防護方案廠址概念模型建置乙項，請就國際核能電廠地下水防護管制作法研析，提出供管制單位審查與視察之具體管制建議。	遵照辦理，相關管制建議將納入期末報告說明。
2	有關 EPRI 導則第 4.5 節州和地方法規相關內容，除研析導則內容外，請就我國相關法規規定研析，提出適用於我國管制之具體建議事項。	遵照辦理，團隊將參考我國相關法規規定，並將相關建議事項納入期末報告說明。
3	廠商於執行計畫需要之相關資料，請本會同仁視需要協助提供，以利執行。如因計畫案而取得或知悉之資料文件，請妥為保管並簽署保密切結書與遵守保密之規定。	遵照辦理，中華民國地球物理學會團隊將妥為保管並遵守保密之規定。
4	依契約工作說明書第七點規定「計畫主持人不得擅自將各項檢(訪)查作業及報告撰寫部分進行分包(委託廠商辦理)」，請廠商確實遵守。	遵照辦理。
5	依本會委託研究計畫經費編列原則及基準規定「資本設備產權歸委託機關，計畫結束後並應返還委託機關」，廠商執行計畫如需購買資本設備，其產權歸屬本會所有。	遵照辦理。

6	計畫執行期間，廠商研究團隊成員如因故須異動時，請於一個月前書面通知本會。	遵照辦理。
7	請廠商配合並協助參與計畫人員有關教育訓練規劃與安排。	遵照辦理。待貴會確認教育訓練需求與內容，團隊將全力配合安排規劃。
8	依契約第五條規定，廠商應於 113 年 7 月 19 日前，提送期中簡報紙本 10 份與其電子檔 1 份，由本會召開期中進度審查會，屆時請廠商配合提報，會議時間地點將另函通知。	遵照辦理。
9	廠商需按契約及工作說明書內容及本會委託研究作業要點執行委託研究，並配合本會進行計畫期中及期末查核，以及本會視需要加開之工作會議。廠商應按季提供研究進度，以利撰寫 GSTP 季報。廠商論文發表前需提供本會檢視初稿，並經論文比對系統檢核始得發表；應遵守學術論理，不得有抄襲情形。	遵照辦理。

「核電廠地下水防護管制廠址模型及監測作業技術要項研  
析」案

期中進度會議審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	本案期中進度簡報經本次會議審查同意通過。	謝謝會議審查及寶貴意見。
2	有關核能電廠地下水防護方案廠址概念模型建置要項，請持續蒐集 NRC 地下水相關文獻，加以研析提出管制建議。	遵照辦理，團隊將持續蒐集並研析相關文獻。
3	有關核能電廠地下水防護方案地下水監測井建置，請持續蒐集 NRC 相關文獻，加以研析提出管制建議。	遵照辦理。
4	請中華民國地球物理學會配合並協助提供計畫參與人員相關教育訓練，訓練時間暫定於 9~10 月，並視狀況調整辦理方式。	遵照辦理，已於 10 月 16 日辦理地下水相關教育訓練。
5	為掌握本案計畫執行方向與進展，預定於 10~11 月份辦理工作進度會議，屆時請中華民國地球物理學會配合提報進度，會議通知將另行函送。	遵照辦理。

「核電廠地下水防護管制廠址模型及監測作業技術要項研  
析」案

第三次工作會議審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	簡報說明「Bruce Power 廠址多次地下水調查包括安裝淺層和深層監測井」、「2022 年共觀察、檢查和監測了 154 個地點」、「地下水井安裝是基於風險評估」，請研析彙整相關資料並提出在廠址設立監測井之技術作法及選擇位置規劃等概念。	遵照辦理，已彙整並提供相關資料加以說明。
2	簡報說明關切核種之數量，視不同電廠之分析以及相同電廠之歷次分析而有所不同，請研析彙整相關資料並提出須納為關切核種的技術作法。	遵照辦理，已彙整並提供相關資料加以說明。
3	有關蒐集國際核電廠運轉與除役期間廠址地下水防護實務經驗部分，請提出可供我國核能電廠地下水防護作業之管制建議。	遵照辦理。
4	本會訂於 10 月 2 日舉行地下水監測井現場實務作業與廠址概念模型教育訓練，請中華民國地球物理學會配合辦理。	遵照辦理。課程因颱風影響延期，已於 10 月 16 日辦理地下水相關教育訓練。
5	研究團隊成員如因故須異動，請事前書面洽經本會同意後辦理。	遵照辦理。

6	倘若研究成果內有透過本會所取得之資料、參數或相關報告，在經過本會審核同意前，不得對外發表，請注意並配合辦理。	遵照辦理。
7	依契約第五條規定，廠商應於 113 年 11 月 29 日前，提送期末報告紙本 10 份(初稿)、電子檔 1 份及原創性舉證措施(文件)，屆時請研究團隊配合提出。	遵照辦理。

「核電廠地下水防護管制廠址模型及監測作業技術要項研  
析」案

期末成果報告審查意見對照表

項次	審查意見	回應說明及修正做法
1	第三章之標題，請配合委託工作內容修正為「核能電廠地下水防護方案地下水監測井建置及測試要項」。	謝謝指正，已完成修正。
2	廠址概念模型之英譯名稱，請統一以「Site Conceptual Model」為「廠址概念模型」之英文譯名。	謝謝指正，已完成修正。
3	EPRI 導則 5.2.1a 節之「井的開發方法」，建議採用工程慣用語，修正為「鑿井工法」。	謝謝指正，已完成修正。
4	EPRI 導則 5.2.3 節之敘述「如果場址水文地質剖面...」，請再檢視原文內容加以潤飾修正。	謝謝指正，整段詞句已完成修正潤飾。
5	EPRI 導則 5.3d 節之敘述，「井的鑽探時對貫穿過的地質材料進行檢查...」，請再檢視原文內容加以潤飾修正。	謝謝指正，此段詞句已完成修正潤飾。
6	第 3.3 節之導則說明 5.4d，請補充說明除役監測井之處置。	謝謝指正，已增加導則說明 5.4d 內容說明。
7	第 3.4 節地下水水質監測井設置之封層作業程序，請再補充說明。	謝謝指正，已完成補充說明。

8	第 3.5 節 監測井建置要項評析之環狀空間密封所使用低滲透性材料，請再檢視補充說明。	謝謝指正，已檢視確認並完成修正。
9	第 5.1 節 結論內容，請依委託工作內容項目修正提出管制單位審查、視察之建議事項。	謝謝指正，已完成修正。
10	第 5.2 節 建議內容，請再補充論述。	謝謝指正，已完成補充論述。
11	<p>技術用語或專有名詞之誤譯需更正如下：</p> <p>(1) 「場址」，請修正為「廠址」。</p> <p>(2) 「潛水泵」，請修正為「沉水泵」。</p> <p>(3) 「石英石」，請修正為「石英砂」。</p> <p>(4) 「發電站」，請修正為「發電廠」。</p> <p>(5) 「CSM」，請修正為「SCM」。</p> <p>「平均線速度」，請修正為「平均線性速度」，並加註英文全名。</p>	謝謝指正，所列之技術用語及專有名詞已完成修正。